

DOI: 10.3901/JME.2018.07.011

# 连杆铰接轮腿式机器人的运动学与步态分析\*

王雁东<sup>1</sup> 唐 昭<sup>1</sup> 戴建生<sup>1,2</sup>

- (1. 天津大学机构理论与装备设计教育部重点实验室 天津 300350;
2. 伦敦大学国王学院自然与机械工程系 伦敦 WC2R 2LS 英国)

**摘要:** 将平行四边形机构应用于轮腿的设计中, 提出了一种新型连杆铰接轮腿式机器人的设计方案。针对该新型轮腿式机器人的特点, 提出了三种不同的步态: 爬行步态、对角步态和滚动步态。借鉴了腿式机器人的一些概念和方法, 对三种步态的生成原理和运动特性进行分析, 并研究了该机器人在采用这三种不同步态情况下的重心高度变化规律、步距、占空比以及稳定裕度。运用 ADAMS 软件对平地 and 沟渠两种地形进行了仿真试验。仿真结果表明, 该新型轮腿式机器人在稳定性、环境适应能力、步行速度等方面有明显的优势, 同时也证明了三种步态的可行性和有效性。

**关键词:** 移动机器人; 轮腿; 步态分析; ADAMS 仿真

**中图分类号:** TP242

## Kinematics and Gait Analysis of a Linkage-jointed Wheel-legged Robot

WANG Yandong<sup>1</sup> TANG Zhao<sup>1</sup> DAI Jiansheng<sup>1,2</sup>

- (1. Key Laboratory of Mechanism Theory and Equipment Design of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300350;
2. School of Natural and Mathematical Sciences, King's College London, University of London, London WC2R 2LS, UK)

**Abstract:** A novel linkage-jointed wheel-legged mobile robot is proposed by applying the parallelogram mechanism. Three gaits, i.e. crawling gait, diagonal gait and rolling gait, of this robot are proposed. The generation principle and kinematics characteristics of three gaits are analyzed by using some concepts and methods of legged robot. The height of the center of gravity, stride lengths, duty factors and stability margins of the robot in the three gaits are studied. Simulation experiments in the flat and ditch are carried out with ADAMS software. The simulation results demonstrate the advantages in stability, environment adaptability and walking velocity of the novel robot and prove the feasibility and validity of these three gaits.

**Key words:** mobile robot; wheel-leg; gait analysis; simulation with ADAMS

## 0 前言

轮式机器人和腿式机器人是传统移动机器人的两个重要分支。其中, 轮式机器人具有机械结构和控制系统简单、在平地上移动速度快等优点, 但是其越障能力较差, 因此被广泛应用于室内以及其他路况较理想的场合; 腿式机器人借助多关节的腿部结构, 可以根据地形选择落足点并调整身体重心的位置, 从而有效增强越障能力和环境适应能力, 但是其机械结构较复杂、对控制系统的要求也较高<sup>[1]</sup>。因此, 结合了以上两种机器人优势的轮腿式机器人

被提出并受到学术界的广泛关注<sup>[2]</sup>。这类机器人不仅具有轮式机器人移动速度较快的优点, 同时其越障性能接近腿式机器人, 其机械结构和控制系统与腿式机器人相比更简单。

单个轮腿结构近似一个不完全的轮子, 其几何外形越接近完整的轮子, 机器人在地面上的稳定性越好、移动速度越快; 反之, 随着轮辐的数量减少、轮缘角的减小, 机器人的越障能力得到提升, 但稳定性和移动速度相应下降。目前, 研究人员主要从以下两方面来提高机器人的综合性能: 优化轮腿的设计参数和与其他运动方式相结合。RHex 系列机器人采用单轮辐、六轮腿设计, 单轮辐的腿部结构表现出较好的越障性能, 但是为了提高稳定性, 六轮腿、六驱动的结构较复杂, 且对控制系统要求较高<sup>[3-5]</sup>。Whegs 系列机器人采用三轮辐、六轮腿设计,

\* 国家自然科学基金重点资助项目(51535008)。20170414 收到初稿, 20170927 收到修改稿

稳定性相比 RHex 系列机器人有明显提升,但是同样存在结构较复杂和对控制系统要求较高的缺点<sup>[6-8]</sup>。ASGUARD 机器人采用五轮辐、四轮腿设计,运动稳定性较好,但是越障能力有待提高<sup>[9]</sup>。RoMiRAMT 机器人采用六轮辐、四轮腿设计,并增加了腰部关节和两自由度的尾部,以提高越障能力和运动稳定性<sup>[10]</sup>。Quadruped 机器人可以实现单轮辐半圆轮腿与完全轮之间的切换,以满足不同的路况需求<sup>[11]</sup>。Wheel Transformer 机器人也可以实现三轮轮腿与完全轮之间的切换,整个切换过程通过一套特殊的触发机构实现,不需要额外添加驱动电动机<sup>[12]</sup>。然而,可变形的腿部结构增加了机械结构的复杂程度,并使系统的可靠性降低。

为了使腿式机器人在步行过程中能够应对不同的地表环境(如平地、沟渠和台阶等),保持稳定行走而不晃动甚至倾覆,对机器人的步行姿态以及各条腿协调性的合理规划是极其重要的,即对机器人进行步态规划<sup>[13-15]</sup>。传统的轮腿式机器人步态规划较简单,大部分四轮腿机器人采用所有轮腿同相的步态, RHex 系列机器人尝试规划了爬楼梯步态<sup>[16]</sup>。

针对上述两种途径的局限性以及传统轮腿式机器人步态规划的单一性,在保持机器人较强的越障能力和较好的运动稳定性的前提下,使机械结构和控制策略尽量简单,提出了一种新型连杆铰接轮腿式机器人的设计方案,并针对其特点规划了三种步态,之后对这三种步态进行了分析和仿真试验验证。

## 1 设计方案

### 1.1 轮腿设计

当机器人穿越崎岖不平的地形时,造成其稳定性下降的一个重要原因是个别轮腿的悬空失效,不能提供应有的支撑。因此,轮腿式机器人可以通过增加轮腿的数量来增加理论支撑点的数量,以提高机器人的稳定性。

基于上述分析,本文巧妙地将平行四边形机构引入到轮腿设计中,提出了一种连杆铰接的双轮腿结构,如图 1 所示。一对双轮腿由两个单轮腿通过连杆铰接而成,单轮腿整体呈三轮辐、三层的结构,相当于三个相同的单轮辐轮腿沿轴向的叠加,如图 2a 所示。多层的轮腿结构可以有效缩短同一对双轮腿中的两个单轮腿之间的距离,使结构更加紧凑。三个轮辐按照叠加的顺序由内向外,依次记为轮辐 a、轮辐 b 和轮辐 c。每个单轮腿拥有一个回转关节,称为髋关节。为增大足底与地面的摩擦力并起到缓冲的作用,每个轮辐的末端安装有两个特制的橡胶

足,橡胶足底近似为圆弧。单轮腿的结构简图如图 2b 所示, $r$  表示轮辐长度、 $\gamma$  为轮缘角, $m$  为轮辐 c 上的连杆铰接孔到髋关节轴线的距离,相邻两轮辐之间的夹角均为  $120^\circ$ 。

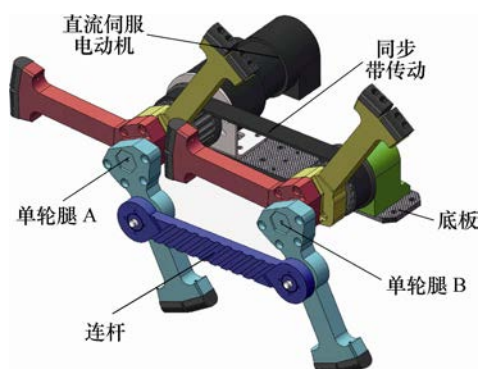


图1 双轮腿三维模型

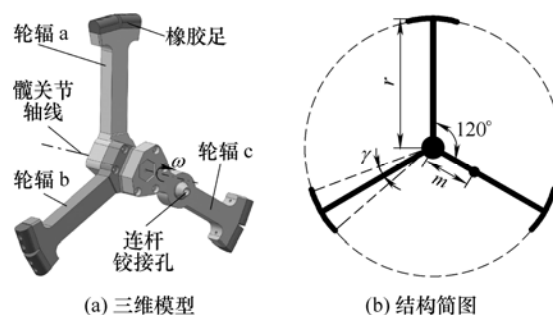


图2 单轮腿设计

组成双轮腿的两个单轮腿均以最外层轮辐(即轮辐 c)与连杆铰接,连杆长度  $n$  等于两个单轮腿髋关节的中心距,连架杆的长度为  $m$ 。这样,底板作为机架,被铰接的两个轮辐作为两个连架杆,再加上上述连杆,就构成了一个平行四边形机构。在双轮腿结构中,通过电动机直接驱动的单轮腿称为主动轮腿,记作轮腿 A,另一个单轮腿称为被动轮腿,记作轮腿 B。

由平行四边形机构的特性可知,两连架杆始终保持平行,且角速度、角加速度也相等。这样,从动轮腿就可以获得和主动轮腿完全相同的运动,从而实现了用一个电动机来驱动两个轮腿。但是,平行四边形机构的另一个特性是:在运动过程中,当四个杆件共线时,机构的自由度会发生变化,机构的运动将不确定<sup>[17]</sup>。为了避免这种情况,在双轮腿的两个髋关节之间增加同步带传动,保证两个髋关节转动方向始终一致,从而避免了机构在四杆共线的分岔位置处的运动不确定性。

### 1.2 机器人整体设计

基于上述的双轮腿结构,本文所设计的新型连杆铰接轮腿式机器人的三维模型如图 3 所示。机器人安装有四对双轮腿,八条髋关节轴线共平面,共

有四个驱动电动机。四对双轮腿按照图示顺序进行编号, 依次记为双轮腿 1~4。为了避免同一侧两对双轮腿的运动产生干涉, 前后双轮腿横向错位布置, 即前面两对双轮腿之间的间距较小, 而后面两对双轮腿之间的间距较大。同时, 为了使整体结构更加紧凑, 降低机器人的身体宽度, 与电动机直接相连的主动轮腿也进行了交错布置。此外, 机器人的结构上下近似对称, 所以当身体上下颠倒时, 仍然可以正常行走。机器人主要尺寸参数见表 1。

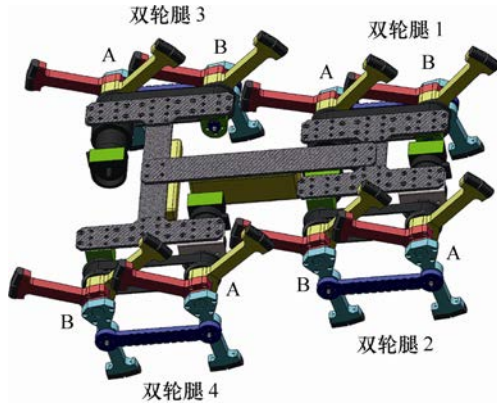


图 3 机器人整机三维模型

表 1 机器人主要尺寸参数

参数	数值
外形最大尺寸 $\left( \frac{\text{长}}{\text{mm}} \times \frac{\text{宽}}{\text{mm}} \times \frac{\text{高}}{\text{mm}} \right)$	480×360×152
轮辐长度 $r/\text{mm}$	88
轮缘角 $\gamma/(\circ)$	10
连杆杆长度 $m/\text{mm}$	30
连杆长度 $n/\text{mm}$	100

## 2 运动学分析

在机器人运动过程中, 每个单轮腿围绕各自髋关节轴线作旋转运动, 一对双轮腿中的两个单轮腿运动状态完全相同。经过步态规划, 四对双轮腿按照一定的相位关系周期性运动, 带动机器人整体向目标方向移动。因此, 单轮腿运动是步态规划的基础。

下面分析独立的单个轮腿在平面上的运动过程。一个轮辐的运动过程(以轮辐 a 为例)如图 4 所示。其中,  $Oxyz$  和  $Hxyz$  分别为与大地和髋关节固连的世界坐标系和髋关节坐标系,  $\omega$  为轮腿角速度, 为了便于分析, 这里将轮腿相对于地面的平移运动转化为了地面的平移运动  $v_g$ (即将  $Hxyz$  作为固定的参考坐标系)。在一个周期内, 单个轮腿的三个轮辐依次与地面接触支撑。根据轮缘与地面摩擦性质的不同, 单个轮辐的支撑阶段又可以分成三个部分: 静支撑阶段 I、滚动支撑阶段和静支撑阶段 II。在静支撑阶段, 轮辐与地面的接触点固定, 为轮缘端点,

在静支撑阶段 I, 接触点为  $P_1$ , 在静支撑阶段 II, 接触点为  $P_2$ ; 在滚动支撑阶段, 轮辐与地面的接触点是时刻改变的, 即轮缘上的点依次与地面接触, 整个轮腿在地面上做纯滚动。规定以轮辐 a 转动到与 y 轴正方向重合的位置为轮腿的初始位置, 轮辐转角  $\theta_i(i=a,b,c)$  为处于支撑阶段的轮辐  $i$  与 y 轴正方向之间的夹角,  $h$  为髋关节轴线距地面的高度, 其表达式为

$$h = \begin{cases} -r \cos(\theta_i + \gamma) & 2\pi/3 < \theta_i < \pi - \gamma \\ r & \pi - \gamma < \theta_i < \pi + \gamma \\ -r \cos(\theta_i - \gamma) & \pi + \gamma < \theta_i < 4\pi/3 \end{cases} \quad (1)$$

上式的三段分别对应轮辐  $i$  经过静支撑阶段 I、滚动支撑阶段和静支撑阶段 II 时的情况。在一个运动周期内, 三个轮辐经历的过程相同, 且彼此间始终保持  $2\pi/3$  的相位差, 如图 5 所示。记轮腿相对于初始位置的累计转角为  $\alpha$ , 将  $\gamma$  和  $r$  的参数代入式(1), 可画出髋关节高度  $h$  随轮腿转角  $\alpha$  的变化曲线, 如图 6 所示。

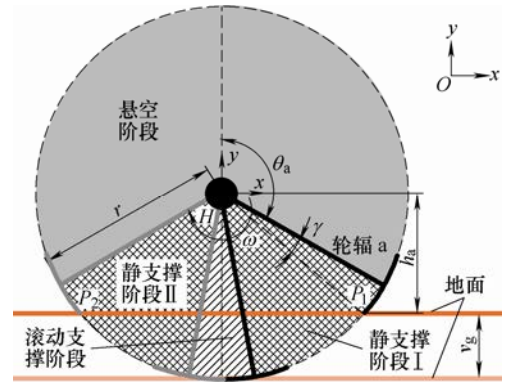


图 4 单轮腿运动过程

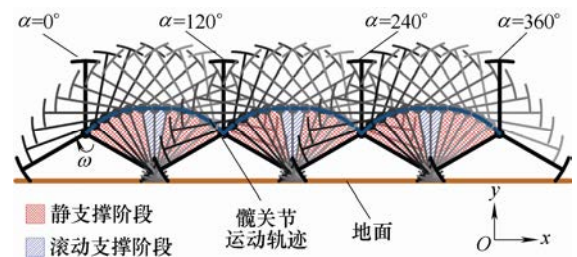
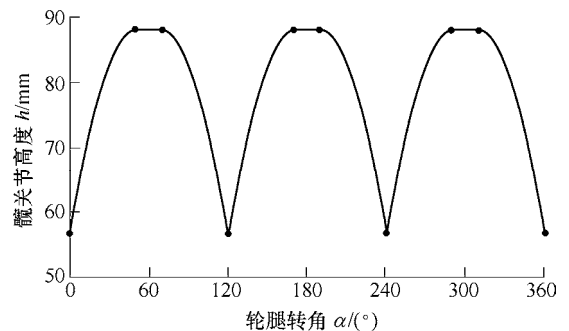


图 5 单轮腿运动过程

图 6 髋关节高度  $h$  变化曲线

### 3 步态分析

在轮腿式机器人的步态规划过程中,借鉴了腿式机器人的一些概念和方法,现做如下定义<sup>[18-19]</sup>。

**定义 1——步态周期:**指在步行过程中,机器人所有轮腿相对于初始位置转动一周所经历的时间,记为  $T$ 。

**定义 2——悬空相、支撑相:**在运动过程中,若轮腿的所有轮辐均不与地面接触,则称其处于悬空相;反之,若至少有一个轮辐与地面接触,则称该轮腿处于支撑相。根据轮缘与地面摩擦性质的不同,支撑相又可以分为两部分:静支撑相和滚动支撑相。

**定义 3——步距:**机器人完成一个步态周期,身体重心相对于地面的平移距离,记为  $\lambda$ 。

**定义 4——稳定裕度:**机器人重心在所有支撑点构成的支撑多边形平面内垂直投影,该投影点到多边形各边的最短距离称为稳定裕度,记做  $S$ 。规定当重心投影在多边形内部时  $S$  为正值。

**定义 5——占空比:**轮腿处于支撑相的时间在整个步态周期中所占的比例,记为  $\beta$ 。

另外,为了简化分析,假设机器人重心位置始终不变,位于机器人身体的几何中心且与八条髋关节轴线共平面。

#### 3.1 爬行步态

爬行步态是轮腿式机器人最基本的步态。当机器人采用爬行步态时,所有轮腿的相位保持一致,因此在平地行走时,机器人理论上始终至少有 8 个着地点,重心高度  $h_G$  变化规律与前文得到的单轮腿髋关节高度  $h$  变化规律相同。将传统的四驱动、四轮腿机器人与本文所提出的新型四驱动、八轮腿机器人进行对比,在步态相同、路况相同的情况下,后者的理论支撑点数量是前者的两倍,因而稳定性也相对较好。所以,爬行步态的主要应用场景为地面情况不理想的崎岖地形。

采用爬行步态时,占空比  $\beta_c=1$ ,即在任意时刻所有轮腿均处于支撑相,因而支撑多边形面积较大,经计算,稳定裕度  $S_c > 27 \text{ mm}$ ,机器人的稳定性很好。步距  $\lambda_c$  的表达式为

$$\lambda_c = 6r \left[ \sin\left(\frac{\pi}{3} - \gamma\right) + \gamma \right] \quad (2)$$

#### 3.2 对角步态

注意到,当机器人对角线上的两对双轮腿保持同相时,这两对双轮腿产生的四个支撑点可以构成一个支撑四边形。类似于腿式机器人,当身体重心的垂直投影落在该支撑四边形内时,轮腿式机器人

可以保持静态稳定。

基于以上分析,该机器人的对角步态规划如下。将对角两对双轮腿作为一组,同组轮腿保持同相,且两组轮腿之间始终保持  $60^\circ$  相位差。按照轮腿的编号顺序,将双轮腿 1、4 作为运动同相的一组,而将轮腿 2、3 作为另一组,第二组相位落后第一组  $60^\circ$ ,两组轮腿交替“悬空-支撑”,且切换瞬间存在两组轮腿同时着地的过渡相。对角步态规划过程(1/3 个周期)如图 7 所示。其中:空心小圆圈  $G$  代表机器人重心位置;实心小圆圈代表机器人足底支撑点,阴影部分为支撑点构成的支撑四边形;虚线圆圈内为单轮腿运动右视示意图,箭头表示轮腿的转动方向,三条实线分别代表三个轮辐,其中粗实线表示该轮辐处于支撑阶段。

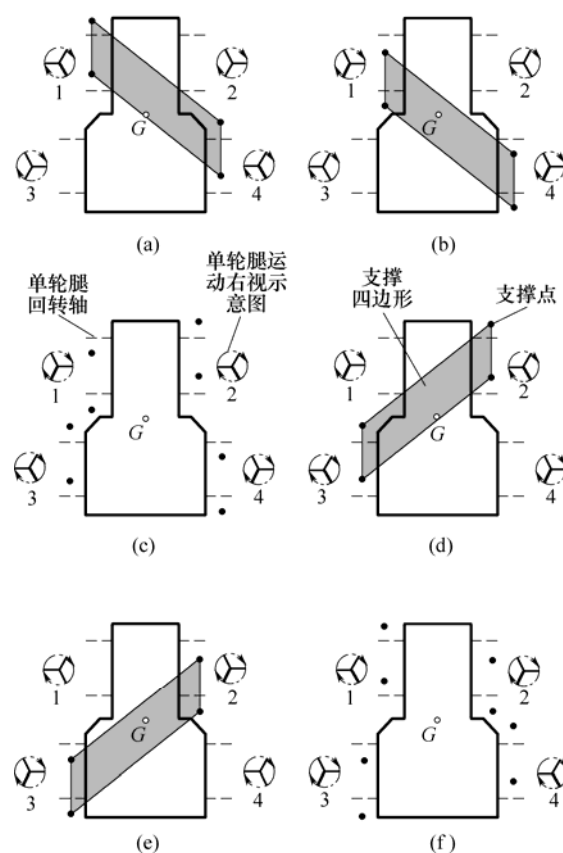


图 7 对角步态示意图

整个运动过程分析如下:图 7a 所示为初始位置,该时刻第一组轮腿(双轮腿 1、4)刚进入支撑相,同时第二组轮腿(双轮腿 2、3)刚进入悬空相;图 7b 所示为第一组轮腿即将离开支撑相、第二组轮腿即将进入支撑相的瞬间;图 7c 所示为两组轮腿同时处于支撑相的运动状态切换瞬间,此时支撑点数量达到最多(8 个);图 7d~7f 所示的运动过程与图 7a~7c 类似,区别是两组轮腿的运动过程交换,至此,机器人完成了 1/3 个周期的运动。在 1/6 个周期中,机器人重心高度  $h_G$  的表达式为

$$h_G = \begin{cases} -r \cos(\theta_j + \gamma) & 5\pi/6 < \theta_j < \pi - \gamma \\ r & \pi - \gamma < \theta_j < \pi + \gamma \\ -r \cos(\theta_j - \gamma) & \pi + \gamma < \theta_j < 7\pi/6 \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $\theta_j (j=a,b,c)$  表示处于支撑相的轮腿中的支撑轮辐与  $y$  轴正方向之间的夹角。若四个电动机转速均设为  $50 \text{ r/min}$ , 并将  $\gamma$  和  $r$  的参数代入, 画出一个周期中  $h_G$  随时间  $t$  的变化曲线, 如图 8 所示。对比爬行步态, 重心高度  $h_G$  的波动幅度明显减小。

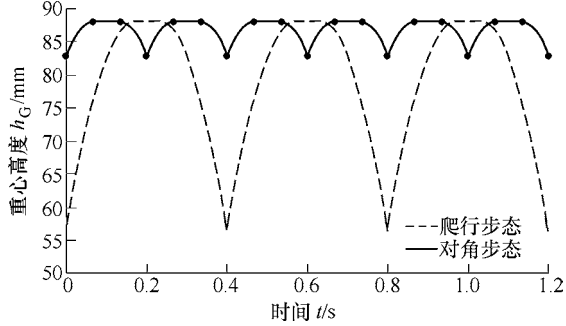


图 8 机器人重心高度  $h_G$  变化曲线

采用对角步态时, 占空比  $\beta_d=0.5$ , 步距  $\lambda_d$  的表达式为

$$\lambda_d = 12r \left[ \sin\left(\frac{\pi}{6} - \gamma\right) + \gamma \right] \quad (4)$$

对对角步态步距  $\lambda_d$  和爬行步态步距  $\lambda_c$  求比值, 记为  $q$ , 其表达式为

$$q = \frac{\lambda_d}{\lambda_c} = 2 \frac{\sin(\pi/6 - \gamma) + \gamma}{\sin(\pi/3 - \gamma) + \gamma} \quad (5)$$

给定不同的轮缘角  $\gamma$ , 绘制出相应的  $\gamma$ - $q$  曲线如图 9 所示。由图可以看出, 在不同的  $\gamma$  取值下,  $q$  始终大于 1, 并随着轮缘角增大而减少。因此, 在电动机转速相同的情况下, 采用对角步态可以提高机器人的步行速度。

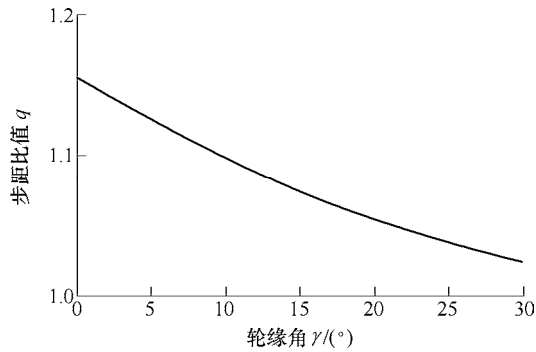


图 9 步距比值  $q$  变化曲线

当机器人采用对角步态时, 其稳定裕度变化曲线如图 10 所示。可以看出, 在整个运动周期, 机器人的稳定裕度  $S_d$  始终大于 0, 即能够保持静态稳定,

但其稳定裕度与爬行步态相比更小, 因此对角步态的主要应用场景为地面情况较理想的平坦地形。

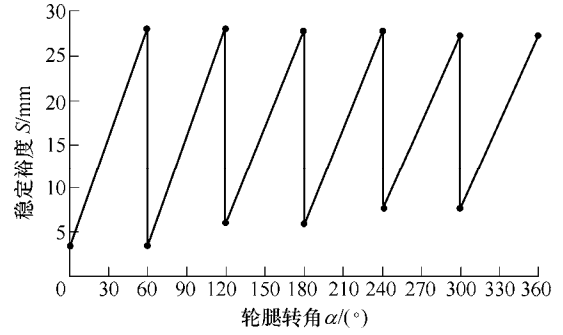


图 10 对角步态稳定裕度  $S$  变化曲线

### 3.3 滚动步态

滚动步态是在对角步态基础上的改进, 步态规划过程与对角步态完全相同。在机器人运动过程中, 滚动支撑相有利于保持机器人重心平稳、提高步行速度。所以, 如果能够找到一种方法来增大滚动支撑相在运动周期中所占的比例, 甚至完全避免静支撑相的出现, 就可以使轮腿式机器人在平地上的移动性能接近轮式机器人。一方面, 可以通过增大轮缘角来增大滚动支撑相的长度。由式(3), 当  $\gamma=30^\circ$  时,  $h_G$  为定值, 即静支撑相消失。但是, 轮缘角过大, 机器人的越障能力会受到削弱, 所以这种方法不可取。而另一方面, 可以通过调整电动机转速来使轮腿更快地通过悬空相。如图 11 所示, 若满足

$$\begin{cases} t_1 = t_2 \\ \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{2\gamma}{2\pi/3 - 2\gamma} \end{cases} \quad (6)$$

此时, 通过悬空相的时间与通过滚动支撑相的时间相同, 静支撑相完全消失, 机器人整体表现出与轮式机器人相似的运动效果。其中, 矩形的长度和高度分别表示时间和角速度, 矩形的面积表示轮腿的角位移, 浅色代表支撑相, 深色代表悬空相。

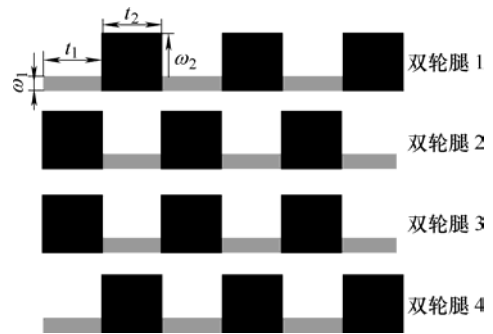


图 11 滚动步态示意图

但是, 由于实际中电动机的最大输出转速是一定的, 为了满足悬空相和支撑相的转速比条件, 滚动步态能够达到的最大速度远小于对角步态。因此,



滚动步态的主要应用场景为对机器人运动平稳性要求较高且平坦的地形。

采用滚动步态时, 占空比  $\beta_r = \beta_d = 0.5$ , 稳定裕度  $S_r$  的变化规律与  $S_d$  也相同, 步距  $\lambda_r$  的表达式为

$$\lambda_r = 12r\gamma \quad (7)$$

## 4 仿真试验及结果分析

为了验证本文所设计的新型连杆铰接轮腿式机器人相比于四驱动、四轮腿机器人的优越性, 本节运用 ADAMS 软件分别对这两种机器人进行了仿真试验。图 12a 为本文所设计机器人的仿真模型, 记为模型 1; 图 12b 为将上述机器人拆除靠近身体中心的四个单轮腿后得到的四驱动、四轮腿机器人的仿真模型, 记为模型 2。

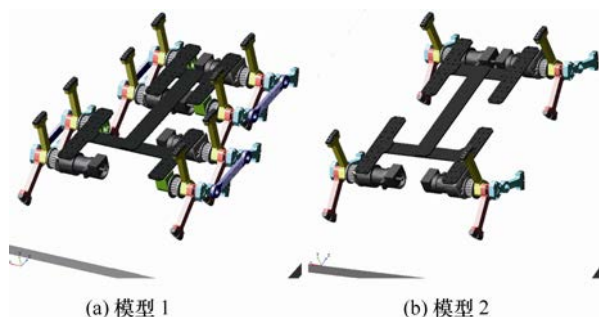


图 12 ADAMS 软件仿真模型

### 4.1 平地行走仿真试验

该部分仿真试验的目的是对上文提出的三种步态进行验证, 从而说明在平地上行走时, 本文所设计的机器人更具优越性。仿真的环境设置为一块表面平整的地板, 橡胶足底与地板的静摩擦因数取 0.35。首先, 对爬行步态进行仿真, 电动机转速设为 50 r/min, 仿真时间设置为 5 s。仿真过程中, 两模型重心高度随时间变化的曲线基本重合, 如图 13 所示。其次, 对对角步态进行仿真, 电动机转速和仿真时间与之前设置相同, 仿真过程如图 14、15 所示。两模型的重心高度随时间变化的曲线有较明显差异, 参考两模型单轮腿 3A 重心高度随时间变化的曲线, 模型 2 的轮腿在运动过程中重心高度偏低且波动幅度较大, 如图 16 所示。将图 13、图 16 分别与图 8 进行对比, 可以发现, 仿真结果与理论计算的结果基本吻合。对比模型 1 在采用两种不同步态时的步行速度变化曲线, 可知在电动机转速相同的情况下, 采用对角步态能够明显提高机器人的平均步行速度。最后, 针对模型 1 就滚动步态进行仿真, 对应滚动支撑相和悬空相的电动机转速分别为 20/3 r/min 和 100/3 r/min, 仿真时间设置为 5 s,

仿真过程如图 18 所示。运动过程中, 机器人重心高度变化曲线接近直线, 实现了类似轮式机器人的运动效果, 如图 19 所示。综上, 相比于四轮腿机器人, 本文所设计的机器人在平地上行走时稳定性更好, 同时步行速度更快。

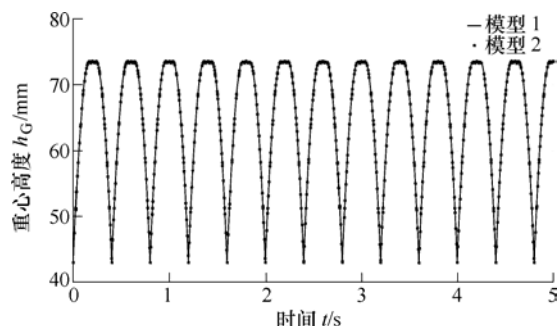


图 13 重心高度变化轨迹对比(平地、爬行步态)

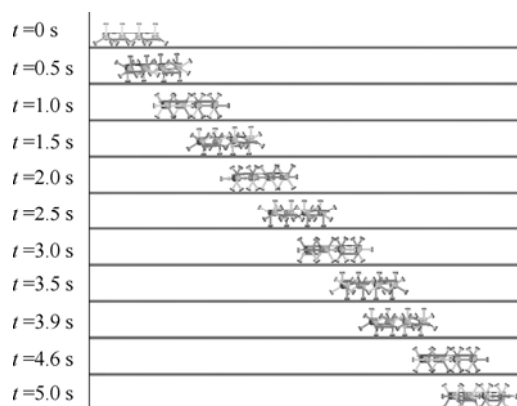


图 14 对角步态仿真图(平地、模型 1)

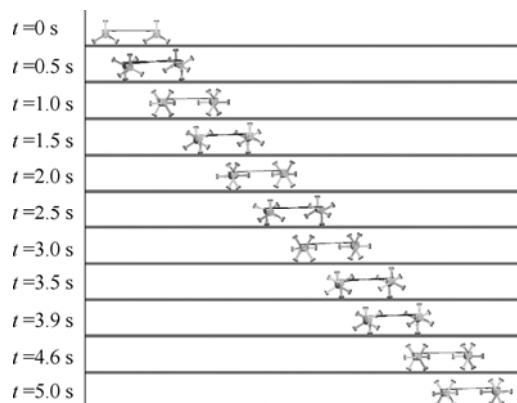


图 15 对角步态仿真图(平地、模型 2)

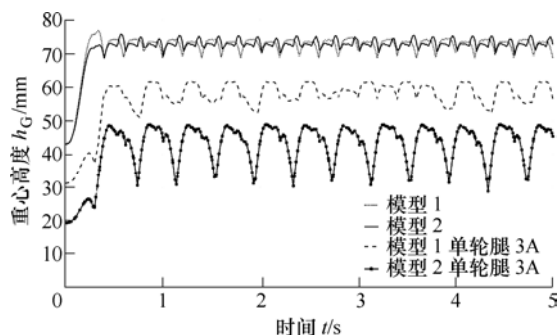


图 16 重心高度变化轨迹对比(平地、对角步态)

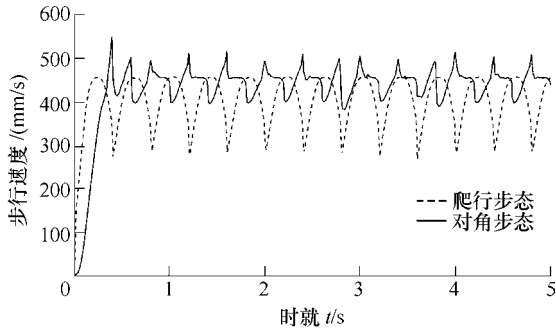


图 17 步行速度变化轨迹对比(平地、模型 1)

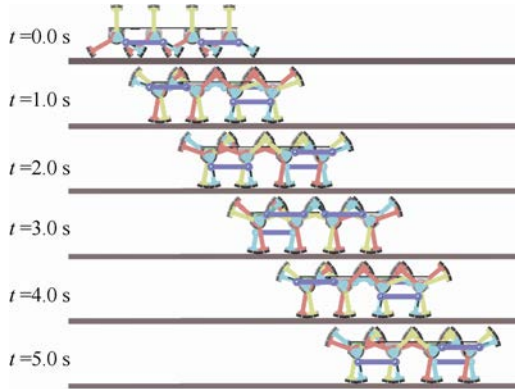


图 18 滚动步态仿真图(平地、模型 1)

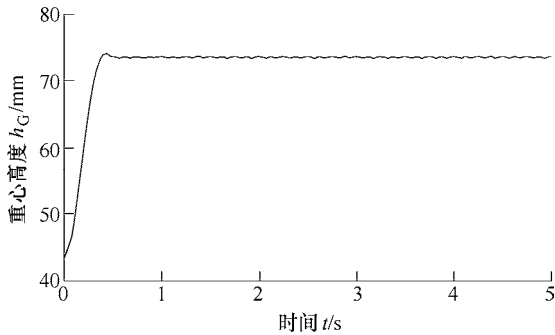


图 19 重心高度变化轨迹(平地、滚动步态)

#### 4.2 沟渠地面行走仿真试验

该部分仿真试验的目的是验证本文所设计的机器人对不平整地面的适应能力更强。仿真的环境为一块表面均匀排布有沟渠的地板, 沟渠的宽度为 40 mm, 略宽于橡胶足底的长度, 沟渠深 25 mm, 相邻沟渠的间隔为 80 mm。橡胶足底与地板的静摩擦系数仍取 0.35。该部分仿真试验共有两组, 即采用爬行步态分别让两个模型通过沟渠地面。电动机转速为 20 r/min, 仿真时间设置为 15 s, 最终得到两条曲线, 分别对应两个模型越障过程中重心高度的变化轨迹, 如图 20 所示。可以发现, 得益于轮腿数量增多所带来的支撑点数量的增多, 模型 1 的重心高度变化曲线与在平地上十分接近, 基本没有出现橡胶足掉入沟渠中的情况, 如图 21 所示; 而模型 2 的重心起伏幅度明显增大, 会经常出现橡胶足掉入沟渠中的情况, 如图 22 所示, 在截取仿真过程的第

3 s、第 7.5 s 和第 9 s, 均出现上述情况。因此, 相较于四轮腿机器人, 本文所设计的机器人对沟渠地面的适应能力更强。

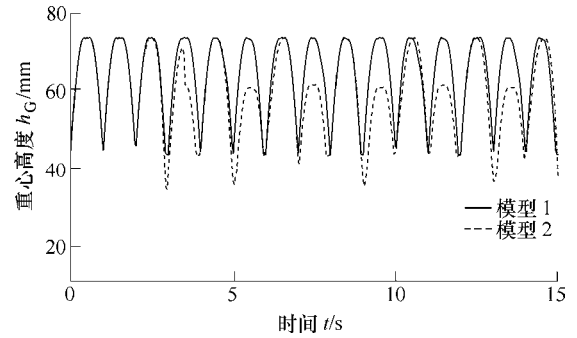


图 20 重心高度变化轨迹对比(沟渠、爬行步态)

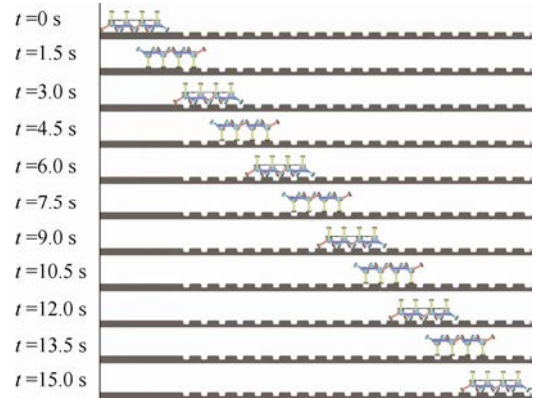


图 21 对角步态仿真图(沟渠、模型 1)

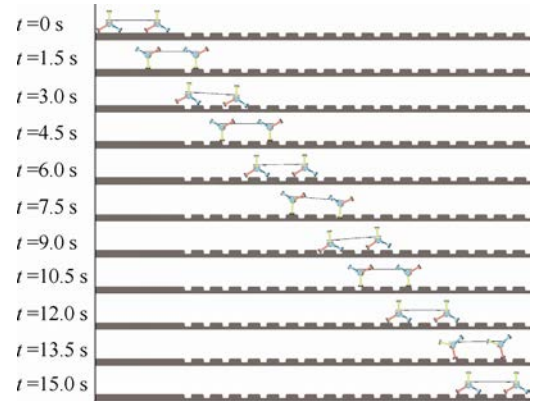


图 22 对角步态仿真图(沟渠、模型 2)

## 5 结论

(1) 本文将平行四边形机构应用于轮腿设计中, 提出了一种新型连杆铰接轮腿式机器人的设计方案。针对这种机器人的特点, 提出了三种步态: 爬行步态、对角步态以及滚动步态。通过理论分析, 说明了三种步态的生成过程和运动特性, 证明了对角步态和滚动步态可以使机器人的运动更加平稳, 同时对角步态有利于提高机器人的步行速度。

(2) 运用 ADAMS 软件, 对本文所提出的新型

连杆铰接轮腿式机器人与四轮腿机器人进行了仿真试验对比, 并对结果进行了分析。仿真结果证明了三种步态是可行和有效的, 数值仿真与理论计算基本吻合, 从而说明了相比于四驱动、四轮腿机器人, 本文所提出的机器人无论在面对平地还是沟渠地面时, 稳定性、环境适应能力、步行速度等多方面均更具优越性。

(3) 本文尚未考虑机器人在高速移动下的动态稳定性, 规划的三种步态均只分析了其静态性能。如何建立机器人的动力学模型, 并对其动态稳定性进行分析和改进, 是一个值得进一步研究的问题。

### 参 考 文 献

- [1] 李磊, 叶涛, 谭民, 等. 移动机器人技术研究现状与未来[J]. 机器人, 2002, 24(5): 475-480.  
LI Lei, YE Tao, TAN Min, et al. Present state and future development of mobile robot technology research[J]. Robot, 2002, 24(5): 475-480.
- [2] VELIMIROVIC A, VELIMIROVIC M, HUGEL V, et al. A new architecture of robot with "wheels-with-legs" (WWL)[C]// International Workshop on Advanced Motion Control, 1998. Amc '98-Coimbra. IEEE, 1998: 434-439.
- [3] SARANLI U, BUEHLER M, KODITSCHKE D E. RHex: A simple and highly mobile hexapod robot[J]. International Journal of Robotics Research, 2001, 20(10): 616-631.
- [4] GALLOWAY K C, HAYNES G C, ILHAN B D, et al. X-RHex: A highly mobile hexapedal robot for sensorimotor tasks[R]. Philadelphia: University of Pennsylvania, 2010.
- [5] ROBERTS S F, DUPERRET J M, LI X, et al. Desert RHex technical report: Tengger desert trip[J]. Technical Reports, 2014.
- [6] QUINN R D, OFFI J T, KINGSLEY D, et al. Improved mobility through abstracted biological principles[C]// IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2002: 2652-2657.
- [7] ALLEN T J, QUINN R D, BACHMANN R J, et al. Abstracted biological principles applied with reduced actuation improve mobility of legged vehicles[C]// IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2003: 1370-1375 vol.2.
- [8] SCHROER R T, BOGGESS M J, BACHMANN R J, et al. Comparing cockroach and Whegs robot body motions[J]. Robotics & Automation, 2004, 4: 3288-3293.
- [9] EICH M, GRIMMINGER F, KIRCHNER F. A versatile stair-climbing robot for search and rescue applications[C]// Safety, Security and Rescue Robotics, 2008. SSRR 2008. IEEE International Workshop on. IEEE, 2008: 35-40.
- [10] KWAK B, BAE J. Design and analysis of a rotational leg-type miniature robot with an actuated middle joint and a tail (RoMiRAMT)[C]// IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2015: 2148-2153.
- [11] CHEN S C, HUANG K J, CHEN W H, et al. Quattroped: A leg-wheel transformable robot[J]. Mechatronics IEEE/ASME Transactions on, 2014, 19(2): 730-742.
- [12] KIM Y S, JUNG G P, KIM H, et al. Wheel transformer: A wheel-leg hybrid robot with passive transformable wheels[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2014, 30(6): 1487-1498.
- [13] 阮鹏, 俞志伟, 张昊, 等. 基于 ADAMS 的仿壁虎机器人步态规划及仿真[J]. 机器人, 2010, 32(4): 499-504.  
RUAN Peng, YU Zhiwei, ZHANG Hao, et al. Gait planning and simulation of gecko inspired robot based on ADAMS[J]. Robot, 2010, 32(4): 499-504.
- [14] 李宏凯, 李志, 郭朝龙, 等. 基于四足机器人稳定性的对角步态规划[J]. 机械设计, 2016(1): 64-69.  
LI Hongkai, LI Zhi, GUO Chaolong, et al. Gait planning of trotting based on quadruped robot' stability[J]. Journal of Machine Design, 2016(1): 64-69.
- [15] 甄伟鲲, 康熙, 张新生, 等. 一种新型四足变胞爬行机器人的步态规划研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(11): 26-33.  
ZHEN Weikun, KANG Xi, ZHANG Xinsheng, et al. Gait planning of a novel metamorphic quadruped robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(11): 26-33.
- [16] 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. 2002: 2222-2227.
- [17] 李端玲, 戴建生, 任治国, 等. 平行四边形组合变胞机构的回路特性分析[J]. 机械设计与研究, 2002(增刊): 120-121.  
LI Duanling, DAI Jiansheng, REN Zhiguo, et al. Loop characteristic analysis of parallelogram combined metamorphic mechanism[J]. Machine Design and Research, 2002(Suppl.): 120-121.
- [18] GONZALEZ-DE-SANTOS P, GARCIA E, et al. Quadrupedal locomotion: An introduction to the control of four-legged robots[M]. New York: Springer-Verlag, 2006.
- [19] 胡斌. 四足机器人结构化地貌典型步态研究[D]. 哈尔



滨：哈尔滨工业大学，2011.

HU Bin. Research on typical gait of quadruped robot on structured terrain[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.

---

**作者简介：**王雁东，男，1992 年出生。主要研究方向为轮腿式机器人和变胞爬行机器人的步态规划与控制。

E-mail: ydongwang@tju.edu.cn

唐昭，男，1991 年出生，博士研究生。主要研究方向为可重构机构及分岔控制、腿式机器人。

E-mail: zhaotang@tju.edu.cn

戴建生(通信作者)，男，1954 年出生，教授，ASME Fellow, IMechE Fellow, ASME 2015 年机构学与机器人学终身成就奖获得者。主要研究领域为旋量理论、变胞机构、可重构机构、抓举理论、康复机器人、医疗机器人和包装机器人。发表学术论文 400 余篇，出版专著 4 部。

E-mail: jian.dai@kcl.ac.uk