

## 一种四足多模式移动机器人的设计与仿真

于新悦 张春燕 平安 丁兵 杨杰

(上海工程技术大学 机械与汽车工程学院, 上海 201620)

**摘要** 为满足在多种地形下更好地完成任务的需求,设计了一种具有行走模式、越障模式和半折叠模式、并可根据不同地形改变运动模式的四足多模式移动机器人。当机器人处于行走模式时,可在普通较平坦路面行走;处于越障模式时,可通过提升腿部高度翻越障碍物;处于半折叠模式时,通过平台的折叠,可缩短轴距,用于较狭窄路况。利用螺旋理论对机构的平台以及腿部进行了自由度分析;运用D-H参数法求解了四足机器人的正运动学方程;利用Adams仿真软件对机器人的3种模式进行了仿真。结果表明,该机器人可完成行走、越障、半折叠平台通过一定宽度通道的任务,实现了机器人的多运动模式。

**关键词** 多模式 自由度 移动机器人 仿真

### The Design and Simulation of a Quadruped Multi-mode Mobile Robot

Yu Xinyue Zhang Chunyan Ping An Ding Bing Yang Jie

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

**Abstract** In order to meet the needs of better completing tasks in a variety of terrains, a quadruped multi-mode mobile robot with walking mode, obstacle crossing mode and semi folding mode is designed, which can change the motion mode according to different terrains. When the robot is in walking mode, it can walk on ordinary flat road; when in obstacle crossing mode, you can climb over obstacles by raising the height of your legs; when in the semi folding mode, the wheelbase can be shortened through the folding of the platform for narrow road conditions. The freedom of the platform and leg of the mechanism is analyzed using the screw theory; the forward kinematic equation of the quadruped robot is solved by D-H parameter method; three modes of the robot are simulated by Adams simulation software. The results show that the robot can complete the tasks of walking, obstacle crossing and the half folding platform can pass through a certain width channel, which realize the multi motion mode of the robot.

**Key words** Multi-mode Degree of freedom Mobile robot Simulation

## 0 引言

目前,根据运动类型的不同,可将机器人种类分为足式机器人、轮式机器人和履带式机器人。由于自身结构的限制,轮式机器人只能在路面连续的环境下行走<sup>[1]</sup>;履带式机器人自身质量较大,在运动过程中灵活性较差<sup>[2]</sup>;足式机器人用途更加广泛,适用于更多场合,可在特殊路面行走,如沙地、沼泽等,也可完成反恐防暴、军事侦察等较危险的工作<sup>[3]</sup>。在足式机器人中,双足机器人体积小、质量轻,但其稳定性较差<sup>[4]</sup>,在平坦路面行走的效率较低;六足机器人稳定性较好,但其结构较复杂;四

足机器人对环境具有极强的适应能力,相对于双足机器人具有更好的支撑性,在设计上也避免了六足或八足机器人的复杂性<sup>[5]</sup>。但由于自身结构的限制,采用单一操作模式的机构不能满足完成不同任务的要求,不能达到一机多用的目的;而多模式机构则可直接完成多种运动模式的切换<sup>[6-10]</sup>。本文中着重研究了四足机器人实现多种操作模式的可行性。

国内外对四足机器人开展了广泛的研究。美国波士顿公司研发的BigDog<sup>[11]</sup>、SpotMini<sup>[12]</sup>,稳定性良好;James等<sup>[13]</sup>设计了一种仿生四足步行机器人,灵活性较高;付晶等<sup>[14]</sup>对四足机器人的步态进行仿真,

具有较好的横向稳定性；孟健等<sup>[15]</sup>设计的负压爬墙机器人，在爬行转向方面具有很好的灵活性；何玉东等<sup>[16]</sup>设计了一种可在地面行走的足式机器人；王吉岱等<sup>[17]</sup>设计了一种可越障的新型四臂巡检机器人，越障效率较高。但上述四足机器人模式单一，只能在某种特定的路况下运动。

为了满足四足机器人在不同境况下完成多种任务的要求，本文中设计了一种四足多模式移动机器人。利用螺旋理论对机器人进行了自由度分析；利用Adams仿真软件对机器人的行走模式、爬台阶模式和半折叠模式进行仿真，证明了设计的机器人可实现预期效果。

## 1 机构描述

图1所示为四足多模式移动机器人的机构图。该机器人由平台 $A_i (i = 1 \sim 4)$ 和4条腿构成。平台为4R机构，各杆件通过转动副相连，且在各转动副上装有驱动电机，平台与腿之间通过U副 $B_i (i = 1 \sim 4)$ 连接，腿部机构包括上腿 $C_i (i = 1 \sim 4)$ 和下腿 $D_i (i = 1 \sim 4)$ 。连接杆件 $A_1$ 、杆件 $A_2$ 的转动副与连接杆件 $A_4$ 、杆件 $A_3$ 的转动副轴线共线，连接杆件 $A_1$ 、杆件 $A_4$ 的转动副与连接杆件 $A_2$ 、杆件 $A_3$ 的转动副轴线共线，因此，上平台可绕转动副轴线发生折叠。以杆件 $A_2$ 为例，较长部分长度为 $a=375$  mm，较短部分长度为 $b=285$  mm，杆件 $A_1$ 中， $c=135$  mm， $d=200$  mm， $e=140$  mm。

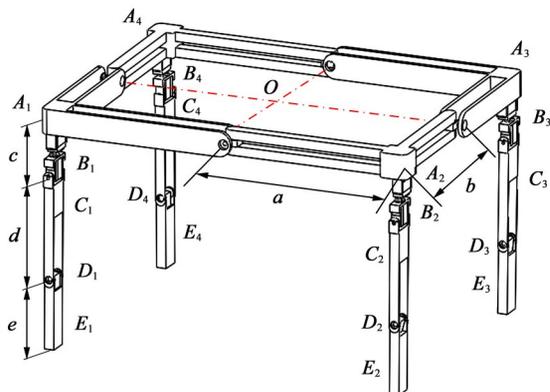


图1 机器人机构图

Fig. 1 Robot mechanism diagram

图2所示为四足多模式移动机器人的腿部结构。腿部由U副、上腿及下腿构成，U副中含有电机1和电机2。电机1连接平台和腿部机构，驱动腿部向外或向内转动任意度数，可用于机器人需完成调整方向的情况；电机2连接上腿，运动时可驱动上腿抬高；电机3安装在上腿与下腿连接的转动副上，驱动

下腿运动，可实现下腿抬高。

## 2 自由度分析

机构的自由度是机构或运动链位型的独立参数的数目<sup>[18]</sup>，机构的自由度 $F$ 为

$$F = d(n - g - 1) + \sum_{i=1}^g f_i \quad (1)$$

式中， $n$ 为包括机架的构件数目； $g$ 为运动副的数目； $f_i$ 为第 $i$ 个运动副的自由度数。

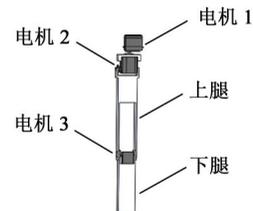


图2 腿部机构图

Fig. 2 Leg mechanism diagram

图3所示为四足机器人的初始位型。平台各螺旋的延长线相交于 $O_1$ ， $O_2$ 为坐标系原点，建立坐标系 $O_2 - xyz$ ， $y$ 轴沿 $A_4A_1$ 方向， $z$ 轴垂直平台向上，根据右手法则，可得 $x$ 轴方向。

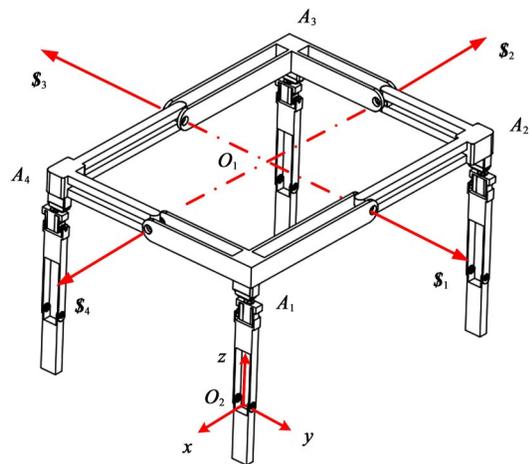


图3 步行模式坐标系示意图

Fig. 3 Schematic diagram of walking mode coordinate system

机构平台的螺旋系分别为

$$\begin{aligned} \mathcal{S}_1 &= (0 \quad 1 \quad 0; -(c+d) \quad 0 \quad -a) \\ \mathcal{S}_2 &= (-1 \quad 0 \quad 0; 0 \quad -(c+d) \quad -b) \\ \mathcal{S}_3 &= (0 \quad -1 \quad 0; c+d \quad 0 \quad a) \\ \mathcal{S}_4 &= (1 \quad 0 \quad 0; 0 \quad c+d \quad b) \end{aligned} \quad (2)$$

其反螺旋为

$$\mathcal{S}_1^r = \left( \frac{a}{c+d} \quad -\frac{b}{c+d} \quad 1; 0 \quad 0 \quad 1 \right) \quad (3)$$

该机器人平台受到 $x$ 轴、 $y$ 轴、 $z$ 轴方向的作用力和 $z$ 轴方向的约束力偶，约束了该平台沿 $x$ 轴、 $y$ 轴、 $z$ 轴的移动和沿 $z$ 轴的转动。

平台的自由度为

$$F_1 = d(n - g - 1) + \sum_{i=1}^g f_i = 2 \quad (4)$$

所以, 平台具有2个分别绕  $x$  轴、 $y$  轴的转动。

图4所示为腿部坐标系示意图。腿部的螺旋系分别为

$$\begin{aligned} \mathcal{S}_{11} &= (0 \ 1 \ 0; 0 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_{12} &= (0 \ 1 \ 0; -d \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_{13} &= (0 \ 0 \ 1; 0 \ 0 \ 0) \end{aligned} \quad (5)$$

其反螺旋分别为

$$\begin{aligned} \mathcal{S}_{11}^r &= (0 \ 1 \ 0; 0 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_{12}^r &= (0 \ 0 \ 1; 0 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_{13}^r &= (0 \ 0 \ 0; 1 \ 0 \ 0) \end{aligned} \quad (6)$$

腿部受到2个约束力和1个约束力偶, 腿部机构受到沿  $y$  轴、 $z$  轴方向的作用力, 约束了腿部沿  $y$  轴、 $z$  轴方向的移动; 受到沿  $x$  轴方向的约束力偶, 约束了腿部绕  $x$  轴的转动。

腿部机构的自由度为

$$F_2 = d(n - g - 1) + \sum_{i=1}^g f_i = 2 \quad (7)$$

所以, 腿部机构具有2个分别绕  $y$  轴、 $z$  轴的转动自由度。

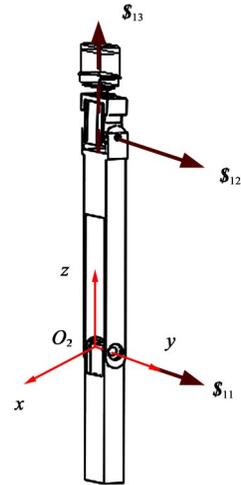


图4 步行模式腿部坐标系示意图

Fig. 4 Schematic diagram of leg coordinate system in walking mode

该机器人处于行走模式和越障模式时具有相同的自由度和约束, 可统一讨论。如表1所示为机器人3种模式下的自由度分析。

其中,  $x_1 = x_3 = c \cos \alpha + a \sin \alpha$ ;

$$z_1 = z_3 = d + c \sin \alpha - a \cos \alpha;$$

$$x_2 = 2(\cos \alpha + a \sin \alpha); \quad y_2 = -b;$$

$$z_2 = z_4 = d + c \sin \alpha; \quad y_3 = -2b; \quad y_4 = -b。$$

表1 四足机器人3种运动模式

Tab. 1 Three motion modes of the quadruped robot

运动模式	步行模式/越障模式	半折叠模式
机构示意图		
机构简图		
平台旋量	$\begin{aligned} \mathcal{S}_1 &= (0 \ 1 \ 0; -(c+d) \ 0 \ -a) \\ \mathcal{S}_2 &= (-1 \ 0 \ 0; 0 \ -(c+d) \ -b) \\ \mathcal{S}_3 &= (0 \ -1 \ 0; c+d \ 0 \ a) \\ \mathcal{S}_4 &= (1 \ 0 \ 0; 0 \ c+d \ b) \end{aligned}$	$\begin{aligned} \mathcal{S}_1 &= (0 \ 1 \ 0; x_1 \ 0 \ z_1) \\ \mathcal{S}_2 &= (-1 \ 0 \ 1; x_2 \ y_2 \ z_2) \\ \mathcal{S}_3 &= (0 \ -1 \ 0; x_3 \ y_3 \ z_3) \\ \mathcal{S}_4 &= (1 \ 0 \ 1; 0 \ y_4 \ z_4) \end{aligned}$
腿部旋量	$\begin{aligned} \mathcal{S}_{11} &= (0 \ 1 \ 0; 0 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_{12} &= (0 \ 1 \ 0; -d \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_{13} &= (0 \ 0 \ 1; 0 \ 0 \ 0) \end{aligned}$	$\begin{aligned} \mathcal{S}_{11} &= (0 \ 1 \ 0; 0 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_{12} &= (0 \ 1 \ 0; -d \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_{13} &= (-1 \ 0 \ 1; 0 \ -(d+c \sin \alpha) \ 0) \end{aligned}$
自由度	2	3

### 3 四足机器人运动学分析

D-H法已成为表示机器人和对机器人运动学进行建模的标准方法。图5所示为运用D-H法建立的四足机器人的运动学模型示意图<sup>[9]</sup>。

在平台质心处以  $O_B$  为原点建立坐标系  $\{B\}$ ，即  $O_B - X_B Y_B Z_B$ 。在腿2的各转动副上依次建立坐标系  $\{1\}$ 、 $\{2\}$ 、 $\{3\}$ ，坐标系  $\{0\}$  位于机器人腿部末端。 $\theta_i (i = 1 \sim 3)$  表示绕  $z_i (i = 1 \sim 3)$  轴的旋转角。该四足机器人4条腿建立坐标系的方法大致相同。本文中在腿2上建立坐标系进行分析。表2所示为其D-H参数。

根据表2所示D-H参数，通过计算求得腿部末端正向运动学方程为

$$\begin{cases} P_x = c(\cos \theta_1 \cos \theta_2 \cos \theta_3 - \sin \theta_1 \sin \theta_2 \cos \theta_3 - \\ \quad \cos \theta_1 \sin \theta_2 - \sin \theta_1 \cos \theta_2) \\ P_y = c(\sin \theta_1 \cos \theta_2 \cos \theta_3 + \cos \theta_1 \sin \theta_2 \cos \theta_3 + \\ \quad \cos \theta_1 \cos \theta_2 - \sin \theta_1 \sin \theta_2) \\ P_z = d + e \end{cases} \quad (8)$$

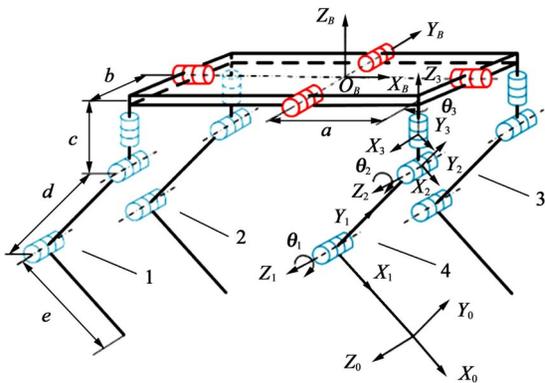


图5 四足机器人运动模型示意图

Fig. 5 Schematic diagram of quadruped robot motion model

表2 四足机器人腿2的D-H参数

Tab. 2 D-H parameters of quadruped robot leg 2

连杆	转角/(°)	连杆偏移/mm	连杆长度/mm	扭角/rad
0	0	0	0	0
1	$\theta_1$	$e$	0	0
2	$\theta_2$	$d$	0	0
3	$\theta_3$	0	$c$	$\pi/2$

### 4 四足机器人仿真分析

#### 4.1 步行模式仿真

利用SolidWorks软件对四足机器人的行走模式建模，导入Adams进行仿真分析。

在步行模式下，与地面接触的腿为支撑腿，依靠电机的驱动与腿和地面间的摩擦向前移动；与地面非接触的腿为摆动腿，依靠电机驱动摆动腿。如图6(a)所示时， $t=0$  s，机器人处于初始位型；如

图6(b)所示时， $t=1.6$  s，机器人的腿1和腿3为摆动腿，向前摆动一定角度，腿2和腿4为支撑腿；如图6(c)所示时， $t=5.4$  s，腿2和腿4为摆动腿，向前摆动相同角度将与地面接触，腿1和腿3为支撑腿；如图6(d)所示时， $t=8.6$  s，为运动状态，腿2和腿4为直立状态，仍为支撑腿，腿1和腿3向前摆动。

图7所示为四足机器人处于步行模式下沿  $x$  轴负方向运动的仿真曲线图。图7(a)为四足机器人平台沿  $x$  轴负方向的位移图，可知机器人在该时间段内的位移；图7(b)为四足机器人腿1的速度，该机器人沿  $x$  轴负方向运动，且在运动过程中腿会摆动，故腿部的速度值会有正负。

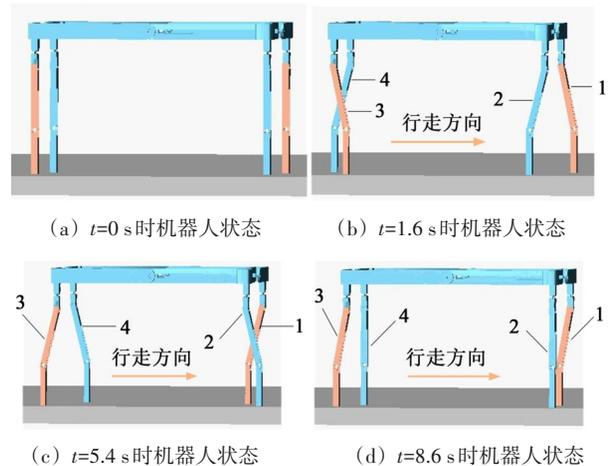
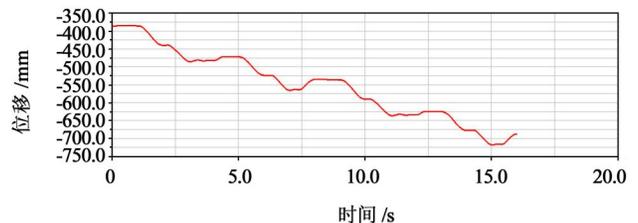
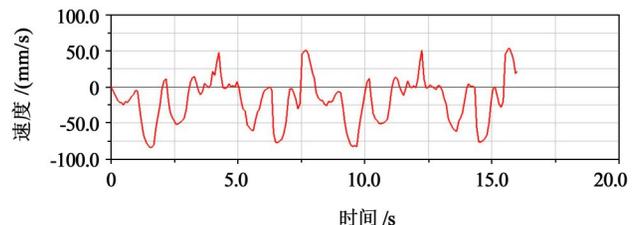


图6 四足机器人步行模式仿真图

Fig. 6 Simulation diagram of walking mode of the quadruped robot



(a) 平台沿负  $x$  轴方向的位移曲线图



(b) 腿1沿负  $x$  轴方向的速度曲线图

图7 步行模式仿真曲线图

Fig. 7 Simulation curve of walking mode

四足步行机器人在运动过程中，运动连续且平稳，未出现侧翻、大幅颠簸状态，证明该四足机器人可实现行走模式。

### 4.2 越障模式仿真

在执行任务时, 机器人会遇到各种复杂的路面情况, 包括遇到障碍物难以通行。所以, 设计的该四足多模式机器人除行走模式外, 也具有越障模式, 可跨越障碍物。在越障时, 机器人可根据障碍物高低调整抬腿高度, 障碍物高度越高, 则机器人抬腿高度越高。该四足多模式移动机器人具有上腿和下腿, 在越障时, 更具有灵活性。

图8所示为四足机器人越障模式仿真。图8(a)为 $t=1.2\text{ s}$ 时机器人前腿1将要越障的位型, 腿1与腿3位型一致, 与地面非接触, 腿2和腿4作为支撑腿与地面接触; 图8(b)为 $t=3.8\text{ s}$ 时机器人前腿1越过障碍与地面接触, 腿3也与地面接触, 越障过程中, 上腿、下腿同时由电机驱动, 摆动一定角度, 前腿1完成越障; 图8(c)为 $t=7.8\text{ s}$ 时前腿2越障, 上下腿摆动角度与前腿1相同, 腿4与腿2步态一致; 图8(d)~图8(f)为机器人后腿越障, 与前腿越障过程相同。

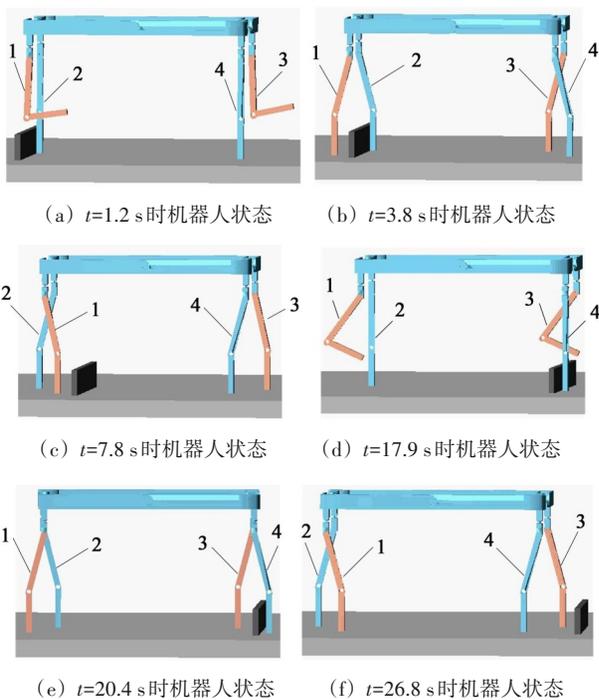
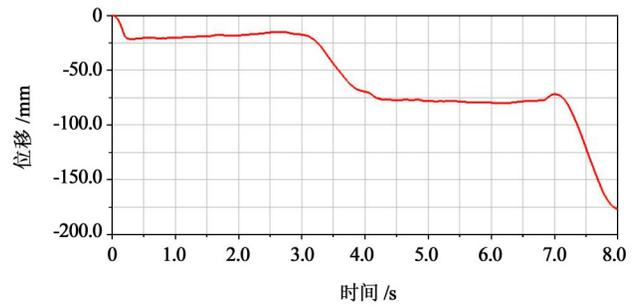


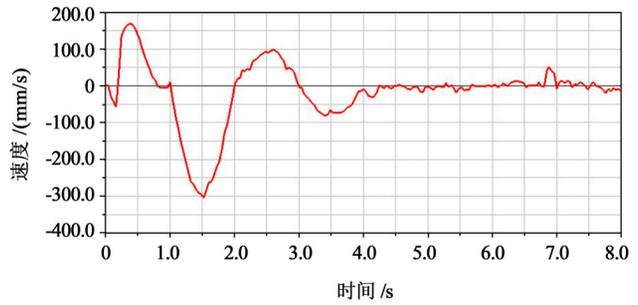
图8 四足机器人越障模式仿真图

Fig. 8 Simulation diagram of obstacle crossing mode of the quadruped robot

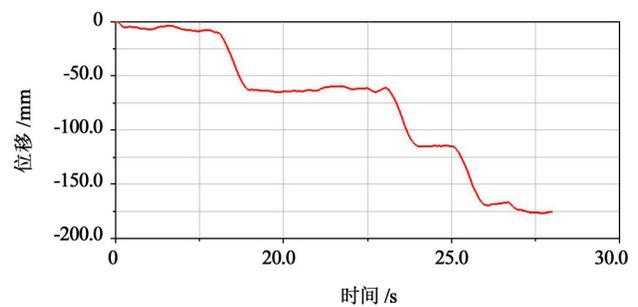
图9所示为四足机器人越障模式仿真曲线图, 该机器人沿负 $z$ 轴方向运动。图9(a)为四足机器人前腿越障时平台沿负 $z$ 轴运动的位移曲线图; 图9(b)为腿1沿负 $z$ 轴越障的速度曲线图; 图9(c)为四足机器人后腿越障时平台沿负 $z$ 轴运动的位移曲线图; 图9(d)为四足机器人腿3沿负 $z$ 轴越障的速度曲线图。该仿真结果说明, 四足多模式机器人可通过障碍物。



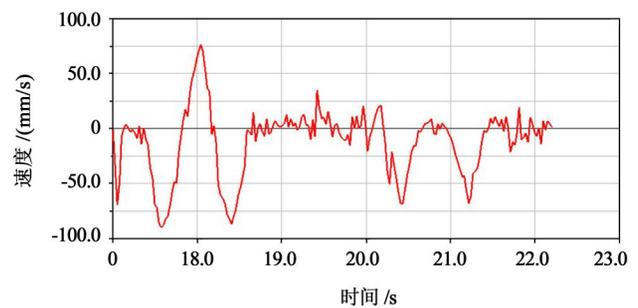
(a) 前腿越障平台沿负 $z$ 轴方向的位移曲线图



(b) 腿1沿负 $z$ 轴方向的速度曲线图



(c) 后腿越障平台沿负 $z$ 轴方向的位移曲线图



(d) 腿3沿负 $z$ 轴方向的速度曲线图

图9 越障模式仿真曲线图

Fig. 9 Simulation curve of obstacle crossing mode

### 4.3 半折叠模式

该机器人的平台不能完全折叠, 因此, 在仿真分析前首先对机构的可折叠角度进行分析。图10所示为平台半折叠机构图。其中,  $\alpha$ 为平台与转动副法线的夹角,  $s$ 为腿部与转动副法线的距离。平台在折叠过程中发生了较大变形, 为了避免出现干涉等现象<sup>[20]</sup>, 规定 $\alpha_{\min} = 17^\circ$ , 其关系式为

$$s = a \sin \alpha + c \cos \alpha \quad (9)$$

图11所示为角度 $\alpha$ 与距离 $s$ 之间的函数关系图,

角度 $\alpha$ 的变化区间为 $17^\circ \sim 90^\circ$ 。

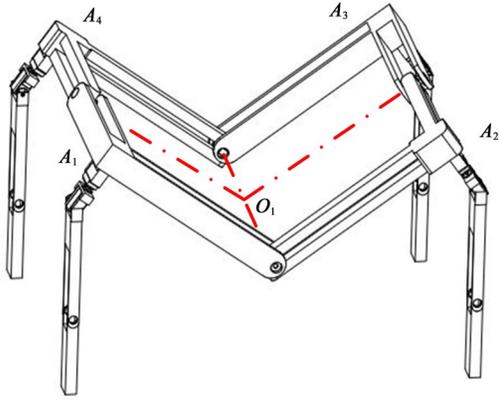


图10 平台半折叠机构图

Fig. 10 Semi-folding mechanism diagram of platform

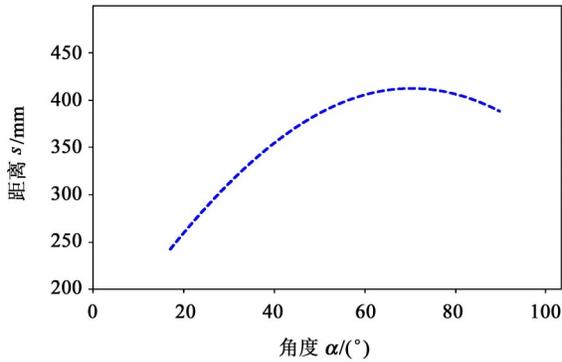


图11 角度 $\alpha$ 与距离 $s$ 函数图

Fig. 11 Function diagram of angle  $\alpha$  and distance  $s$

图12所示为四足机器人在该模式下处于一定宽度通道的侧视图，两边为设置的障碍板，杆件 $A_1$ 、杆件 $A_4$ 与杆件 $A_2$ 、杆件 $A_3$ 向内折叠任一角度，该角度须在可折叠范围内，可有效缩短机器人的轴距。

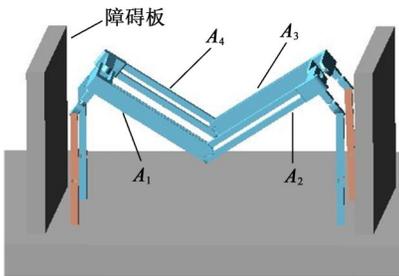


图12 四足机器人半折叠模式侧视图

Fig. 12 Side view of quadruped robots in semi folding mode

为方便观察机器人在狭窄通道内的步态，设置两边障碍板为半透明。该四足机器人的运动通过电机驱动与摩擦实现。图13(a)所示为机器人的初始状态， $t=0$  s，机器人的腿部与地面均接触；图13(b)所示为 $t=1.6$  s时机器人的运动姿态，腿2和腿4的电机1驱动腿部向前转动一定角度，同时驱动电机2和电机3，此时，腿2和腿4向前运动一定距离，腿1和腿3为支撑腿；图13(c)为 $t=6.2$  s时机器人的

运动姿态，腿1和腿3向前运动，腿2和腿4为支撑腿；图13(d)为 $t=10.8$  s时机器人的运动姿态，腿2和腿4向前运动，腿1和腿3为支撑腿。

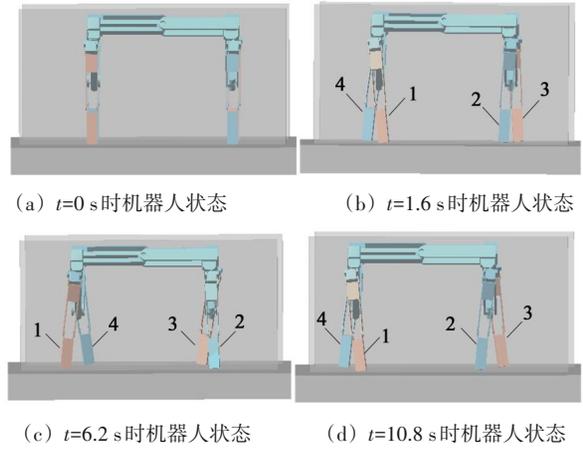
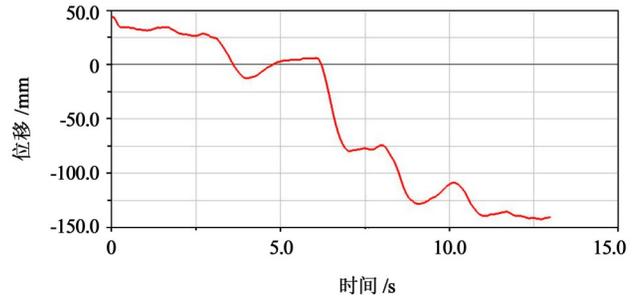


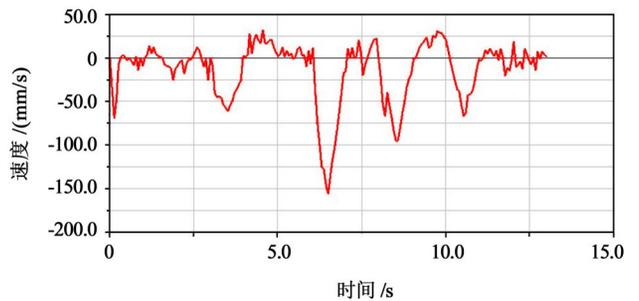
图13 四足机器人半折叠模式仿真图

Fig. 13 Simulation diagram of half folding mode of quadruped robots

图14所示为四足机器人处于半折叠模式的仿真曲线图，该机器人沿负 $z$ 轴方向运动。图14(a)为四足机器人的平台沿负 $z$ 轴方向运动的位移曲线图；图14(b)为四足机器人腿1沿负 $z$ 轴方向运动的速度曲线图。在运动过程中，该机器人腿部由于摆动原因，速度方向会有正负。



(a) 平台沿负 $z$ 轴方向的位移曲线图



(b) 腿1沿负 $z$ 轴方向的速度曲线图

图14 半折叠模式仿真曲线图

Fig. 14 Semi folding mode simulation curve

## 5 结论

设计了一种四足多模式移动机器人，具有3种模式：步行模式、越障模式和半折叠模式，可用于多种场合。对机构进行了理论分析，并运用 Adams 软

件进行了仿真,并对仿真曲线图进行分析。结果表明,该机器人的各种模式均可实现。在普通路面,机器人可较稳定行走;在有障碍物时,机器人可顺利通过障碍物;在通过一定宽度通道时,可在半折叠模式下顺利通过,说明了设计的合理性。该设计为机器人应用于侦察、探测等任务的进一步研究提供了一定的理论基础和思路。

## 参 考 文 献

- [1] 马芳武,倪利伟,吴量,等.主动悬架轮腿式全地形移动机器人俯仰姿态闭环控制[J].农业工程学报,2018,34(20):20-27.  
MA Fangwu, NI Liwei, WU Liang, et al. Pitch attitude closed-loop control of active suspension wheel leg all terrain mobile robot [J]. Journal of Agricultural Engineering, 2018, 34(20): 20-27.
- [2] 王鹏飞,孙立宁,黄博.地面移动机器人系统的研究现状与关键技术[J].机械设计,2006,23(7):1-4.  
WANG Pengfei, SUN Lining, HUANG Bo. Research status and key technologies of ground mobile robot system [J]. Journal of Mechanical Design, 2006, 23(7): 1-4.
- [3] 杨钧杰,孙浩,王常虹,等.四足机器人研究综述[J].导航定位与授时,2019,6(5):61-73.  
YANG Junjie, SUN Hao, WANG Changhong, et al. Review of quadruped robot research [J]. Navigation, Positioning and Timing, 2019, 6(5): 61-73.
- [4] 胡凌云,孙增圻.双足机器人步态控制研究方法综述[J].计算机研究与发展,2005(5):728-733.  
HU Lingyun, SUN Zengqi. Overview of research methods of biped robot gait control [J]. Computer Research and Development, 2005(5): 728-733.
- [5] 常同立,和建增,郭志鹏.四足机器人的腿部拓扑结构研究及其动力学仿真[J].液压与气动,2018(12):60-64.  
CHANG Tongli, HE Jianzeng, GUO Zhipeng. Research on leg topology and dynamic simulation of quadruped robot [J]. Hydraulic and Pneumatic, 2018(12): 60-64.
- [6] 于靖军,刘凯,孔宪文.多模式机构研究进展[J].机械工程学报,2020,56(19):14-27.  
YU Jingjun, LIU Kai, KONG Xianwen. Research progress of multi-mode mechanism [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(19): 14-27.
- [7] ZHANG C Y, WAN Y, ZHANG D. A new mathematical method to study the singularity of 3-RSR multimode mobile parallel mechanism [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2019(4): 1-11.
- [8] LIU X Y, ZHANG C Y, NI C, et al. A reconfigurable multi-mode walking-rolling robot based on motor time-sharing control [J]. Industrial Robot: An International Journal, 2020, 47(2): 293-311.
- [9] 蒋新星,张春燕,刘香玉,等.单闭链全R副多模式全向地面移动机器人[J].机械科学与技术,2021,40(8):1193-1203.  
JIANG Xinxing, ZHANG Chunyan, LIU Xiangyu, et al. Single closed chain full R pair multi-mode omnidirectional ground mobile robot [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2021, 40(8): 1193-1203.
- [10] ZHANG C Y, XIE M J, ZHANG D. Kinematics analysis and optimization of a multi-mode mobile parallel mechanism [J]. Machine Design and Research, 2021, 28(1): 276-284.
- [11] RAIBERT M, BLANKESPOOR K, NELSON G, et al. BigDog, the rough-terrain quadruped robot [J]. World Congress, 2008, 41(2): 10822-10825.
- [12] 刘京运.从 Big Dog 到 Spot Mini: 波士顿动力四足机器人进化史 [J]. 机器人产业, 2018(2): 109-116.  
LIU Jingyun. From Big Dog to Spot Mini: evolution history of Boston powered quadruped robot [J]. Robot Industry, 2018(2): 109-116.
- [13] JAMES P M, PRAKASH A, V KALBURGI, et al. Design, analysis, manufacturing of four-legged walking robot with insect type leg [J]. Science Direct, 2021, 4647-4652.
- [14] 付晶,党宏社,王亚波,等.四足机器人步态规划研究[J].陕西科技大学学报,2020,38(3):138-144.  
FU Jing, DANG Hongshe, WANG Yabo, et al. Research on gait planning of quadruped robot [J]. Journal of Shaanxi University of Science and Technology, 2020, 38(3): 138-144.
- [15] 孟健,李贻斌,柴汇,等.连续不规则台阶环境四足机器人步态规划与控制[J].机器人,2015,37(1):85-93.  
MENG Jian, LI Yibin, CHAI Hui, et al. Gait planning and control of quadruped robot in continuous irregular step environment [J]. Robot, 2015, 37(1): 85-93.
- [16] 何玉东,王军政,柯贤锋,等.足式机器人的稳定行走[J].机械工程学报,2016,52(21):1-7.  
HE Yudong, WANG Junzheng, KE Xianfeng, et al. Stable walking of legged robot [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(21): 1-7.
- [17] 王吉岱,王静,魏军英.一种新型四臂巡检机器人的机械本体设计与越障仿真分析[J].机械传动,2015,39(6):103-106.  
WANG Jidai, WANG Jing, WEI Junying. Mechanical body design and obstacle crossing simulation analysis of a new four arm inspection robot [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2015, 39(6): 103-106.
- [18] 黄真,赵永生,赵铁石.高等空间机构学[M].北京:高等教育出版社,2006:111-116.  
HUANG Zhen, ZHAO Yongsheng, ZHAO Tieshi. Higher space mechanism [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 111-116.
- [19] 谢楚政,李光,于权伟,等.四足机器人Trot步态规划与仿真分析[J].湖南工业大学学报,2021,35(5):32-40.  
XIE Chuzheng, LI Guang, YU Quanwei, et al. Gait planning and simulation analysis of quadruped robot trot [J]. Journal of Hunan University of Technology, 2021, 35(5): 32-40.
- [20] 何妍颖,李晔卓,武建响,等.多模式两轮移动机器人的设计与运动分析[J].机械工程学报,2019,55(23):83-92.  
HE Yanying, LI Yezhuo, WU Jianxu, et al. Design and motion analysis of multi-mode two wheeled mobile robot [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(23): 83-92.

收稿日期: 2021-09-04 修回日期: 2021-09-10

基金项目: 国家自然科学基金(52005317)

作者简介: 于新悦(1998—),女,河北衡水人,硕士研究生;研究方向为机器人机构设计。