

## 具有悬挂系统的轮腿式机器人设计与分析

潘希祥<sup>1</sup>, 徐 坤<sup>2</sup>, 王耀兵<sup>3</sup>, 丁希仑<sup>2</sup>

(1. 北京航空航天大学中法工程师学院, 北京 100191; 2. 北京航空航天大学机械设计及自动化学院, 北京 100191;  
3. 北京空间飞行器总体设计部空间智能机器人系统技术与应用北京市重点实验室, 北京 100094)

**摘 要:** 设计了一种具有独立悬挂系统和足端缓冲机构的六足轮腿式机器人。该机器人结合了轮式机器人和腿式机器人的优点, 同时将汽车的独立悬挂系统的设计思想应用在机器人上, 降低了不平整地面对机器人的冲击, 并减轻了由此引起的振动, 保证了机器人在不同的复杂环境下机身内部环境的稳定。本文对该机器人的机构与结构进行阐述, 建立了其运动学模型以及其悬挂系统机构和足端缓冲机构的单自由度振动模型, 并对其缓冲机理进行分析对比。通过 ADAMS 仿真软件在不同地形环境下对其进行动力学仿真分析, 验证了在机器人的运动过程中, 与足端缓冲机构相比, 悬挂系统的缓冲减震效果受地形影响较小, 且悬挂系统和足端缓冲机构相结合会比单一缓冲机构具有更好的缓冲减震作用。

**关键词:** 轮腿式机器人; 结构设计; 悬挂系统; 缓冲机构; 动力学仿真

**中图分类号:** TP242

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-0446(2018)-03-0309-12

## Design and Analysis of a Wheel-Legged Robot with a Suspension System

PAN Xixiang<sup>1</sup>, XU Kun<sup>2</sup>, WANG Yaobing<sup>3</sup>, DING Xilun<sup>2</sup>

(1. Sino-French Engineer School, Beihang University, Beijing 100191, China;  
2. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China;  
3. Beijing Key Laboratory of Intelligent Space Robotic Systems Technology and Applications,  
Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China)

**Abstract:** A 6-leg wheel-legged robot with an independent suspension system and a foot buffer mechanism is designed, which combines both advantages of the legged robot and the wheeled robot. An independent suspension system referred to the vehicles is applied to the robot to buffer the impact on the robot from the uneven ground and reduce the vibration, so that the inner environment can be stabilized in different complex environments. The mechanism and the structure of the proposed robot are particularly presented. The kinematics models of the robot, and the single-degree-of-freedom vibration models of its suspension mechanism and foot buffer mechanism are developed, and the buffering mechanisms are analyzed and compared. Dynamics simulations and analysis are carried out in different terrains with the software ADAMS. The results show that the independent suspension system can adapt better to different terrains in robot motion than the foot buffer mechanism, and the design combining both the suspension system and the foot buffer mechanism has a better buffering function than the design with a single buffer mechanism.

**Keywords:** wheel-legged robot; structure design; suspension system; buffer mechanism; dynamics simulation

### 1 引言 (Introduction)

常规的移动机器人包括轮式机器人和履带式机器人, 与之相比, 足式机器人具有更强的地形适应能力以及更好的机动性能<sup>[1]</sup>。作为足式机器人的典型代表, 六足机器人具有丰富的步态和冗余的肢体结构, 运动灵活, 可以在离散的地面上移动、跨越障碍等<sup>[2]</sup>。但在平坦的地面环境下, 与轮式、履

带式移动机器人相比, 传统的足式机器人则存在移动速度慢、效率低的缺点。综合以上问题, 出现了轮腿混合式机器人的设计思想, 即结合了轮式和腿式机器人的优点, 设计出轮腿融合一体的结构, 可以根据不同的地面环境切换不同的运行模式, 如日本东北大学研制的 Chariot<sup>[3]</sup> 机器人, 德国研制的 ALDURO<sup>[4]</sup> 机器人、美国 JPL (喷气推进实验室) 研制的 ATHLETE<sup>[5]</sup> 机器人以及北京航空航天大学

的 NOROS<sup>[6]</sup> 轮腿式机器人。在崎岖的地形环境中, 轮腿式机器人采用“足”与地面接触, 实现步行模式, 具有较好的越障能力; 在平坦的地形环境中, 则采用轮子与地面接触, 实现轮行模式, 具有较高的移动效率。这使轮腿式机器人具有很强的地形适应能力<sup>[7]</sup>。

在汽车制造中, 悬挂系统是应用于汽车车架与车轮或车桥之间的连接装置的总称, 可分为非独立悬挂系统和独立悬挂系统 2 种<sup>[8]</sup>。其中非独立悬挂系统是指 2 个车轮相互联系, 一侧车轮的跳动同时也会影响另一侧车轮的跳动。而独立悬挂系统中的各个车轮有各自的悬挂机构, 彼此相互独立, 互不干扰, 提高了汽车的平稳性和舒适性<sup>[9]</sup>。通过悬挂系统, 可有效地降低移动平台的震动, 缓冲平台关键零件之间的冲击, 提高平台的稳定性和可靠性。目前大多数足式机器人的缓冲装置设计在小腿的足端, 虽已有学者提出了一种应用于轮式机器人的悬挂系统<sup>[10]</sup>, 实现了对机器人本体的减震, 但悬挂系统在足式机器人中未见相关的研究应用。

作为移动平台, 六足轮腿式机器人具有出色的移动能力和地形适应能力<sup>[11]</sup>。通过在机器人本体上装载各种设备, 可以作为特种机器人在复杂环境中执行各种任务, 这要求机器人在高承载的情况下在不平整地形环境的移动过程中, 减少机器人本体受到的运动冲击以保证机身内设备正常工作<sup>[12]</sup>。目前轮腿式机器人在步行模式下传统的缓冲减震方式是在机器人的小腿足端处安装一个足端缓冲机构, 而其在轮行模式下则没有相应的缓冲机构。

本文提出一种具有独立悬挂系统的新型轮腿式六足机器人的设计思想, 在结合了轮式机器人和足式机器人的优点的同时, 将独立悬挂系统应用在机器人的机身与单腿之间, 使机器人在步行模式和轮行模式下运动过程中, 都可以有效地对机器人本体实现缓冲减震的作用。因此, 该机器人具有较强的地形适应能力, 同时在复杂环境下运动时机器人机身内部环境具有较高的稳定性。

## 2 整体机构与结构设计 (Mechanism and structure design)

本文提出的具有悬挂系统的轮腿式六足机器人在步行模式下站立时的机构简图如图 1 所示。为了使机器人在步行运动过程中可以实现零半径转弯, 机器人的本体设计为正六边形, 每条腿有 3 个主动关节: 跟关节、髌关节和膝关节。其中跟关节具有 1 个旋转自由度, 转轴与  $z$  轴平行, 可以实现单腿

的横摆; 髌关节和膝关节均具有 1 个转动自由度, 转轴均与  $y$  轴平行, 均可以实现纵摆。悬挂机构设置于跟关节与髌关节之间, 同时在小腿的足端有缓冲机构。机器人的 6 条腿结构完全一样, 均匀地分布在本体的正六边形的 6 个角上。

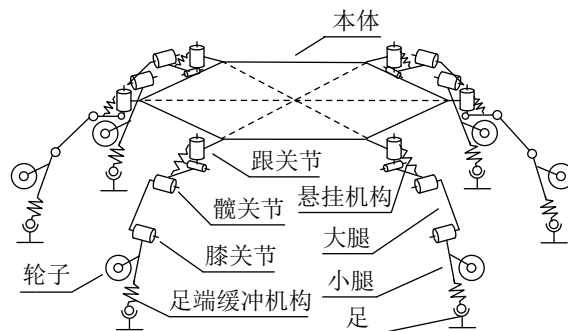


图 1 机器人机构设计简图

Fig.1 Design sketch of the robot mechanism

由于自然界中拥有 6 条腿结构的动物主要是昆虫, 因此机器人的腿关节仿照昆虫腿结构进行布局<sup>[13]</sup>, 其腿部结构如图 2 所示。机器人的足端与小腿的连接为一个球铰结构, 在与支撑面的接触过程中会被动地适应支撑面。

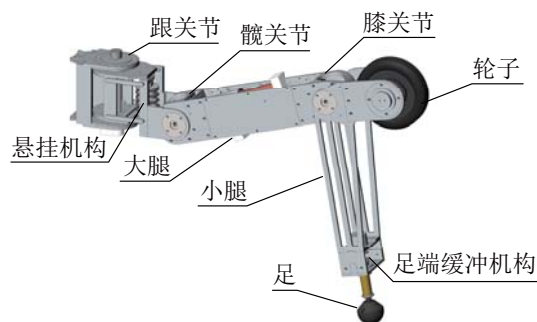


图 2 机器人腿部结构

Fig.2 Structure of the robot leg

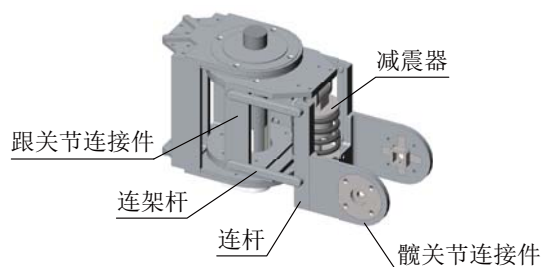


图 3 悬挂系统结构

Fig.3 Structure of the suspension system

机器人的独立悬挂系统由 6 个悬挂机构共同组成, 每个悬挂机构安装在机器人每条腿的跟关节与髌关节之间, 主要包括跟关节连接件、连架杆、连杆、髌关节连接件和减震器, 如图 3 所示。其中 4

根连架杆和跟关节连接件、连杆构成2个平行四边形机构, 4根连架杆等长且平行. 减震器位于2个平行四杆机构之间, 其两端分别与跟关节连接件和连杆连接. 在自然伸直状态下, 减震器内部存在一个机械限位, 此时其长度是固定的, 不会因受拉而伸长, 其内在结构为一个弹簧—阻尼系统. 单腿的悬挂机构具有1个被动自由度, 其运动与单腿的受力情况有关.

机器人的轮子安装在小腿上, 为了减小机器人在轮行过程中地面的反作用力对膝关节的转矩, 在轮子的设计上应保证轮子与地面接触的力的反作用线经过轮子的轴线以及膝关节的轴线, 在本设计中, 轮子与膝关节的连线与小腿垂直.

整个机器人共有18个主动关节和6个轮子. 各转动关节处采用Maxon直流电机进行驱动. 具有独立悬挂系统的轮腿式机器人的3维模型如图4所示, 机器人运作所需的锂电池、控制系统等电子硬件安装在机器人机身的内部, 此外还可以在机身上安装双目摄像头及其他传感器等附加装置, 使其可以在复杂危险的环境下完成灵活可靠的操作.

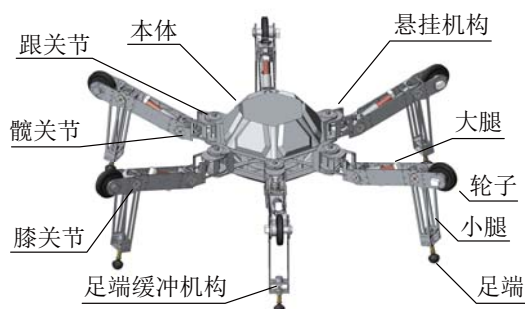


图4 机器人整体3维模型

Fig.4 3-dimensional robot model

### 3 运动学分析 (Kinematics analysis)

具有悬挂系统的轮腿式机器人在步行模式的行走过程中, 当机器人的腿末端离开地面时, 足端在空中摆动, 称该状态的腿为摆动腿<sup>[14]</sup>. 对于摆动腿, 其足末端没有受到地面对它的反作用力, 由于悬挂机构的减震器的限位, 跟关节和髋关节之间可以看成是一个刚性连接. 基于上述分析, 对机器人的摆动腿进行运动学分析.

#### 3.1 正运动学分析

腿部的笛卡儿坐标系见图5, 以单腿与基体连接处的跟关节的坐标系为惯性坐标系 $\{S\}$ , 坐标原点为 $O$ , 足末端点对应的坐标系为工具坐标系 $\{T\}$ , 坐标原点为 $P$ ,  $\alpha, \beta, \gamma$ 分别为跟关节、髋关节和膝关节的角度位置, 按照右手定则定义,  $L_1, L_2, L_3$  分

别为跟关节到髋关节、大腿和小腿的长度.

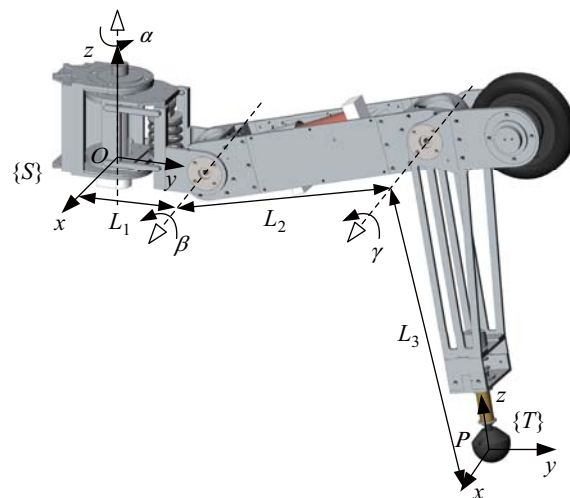


图5 摆动腿坐标系

Fig.5 Coordinate system of the swing leg

机器人的正运动学问题就是根据机器人本体位姿 $g_o$ 和腿的驱动关节变量 $\alpha, \beta$ 和 $\gamma$ 来确定机器人的足端在惯性坐标系 $\{S\}$ 下的位置 $g_{OP}$ . 取 $\alpha = \beta = \gamma = 0$ 对应单腿完全伸展开的位形为初始位形, 此时惯性坐标系与工具坐标系的变换为

$${}^S_T g(0) = \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{I}_{3 \times 3} & L_1 + L_2 + L_3 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

构造3个驱动关节的运动旋量:  $\omega_1 = [0, 0, 1]^T$ ,  $\omega_2 = \omega_3 = [1, 0, 0]^T$ .

取轴线上的点:  $r_1 = [0, 0, 0]^T$ ,  $r_2 = [0, L_1, 0]^T$ ,  $r_3 = [0, L_1 + L_2, 0]^T$ , 产生的运动旋量为

$$\begin{aligned} \xi_1 &= \begin{bmatrix} \omega_1 \\ r_1 \times \omega_1 \end{bmatrix} = [0, 0, 1, 0, 0, 0]^T \\ \xi_2 &= \begin{bmatrix} \omega_2 \\ r_2 \times \omega_2 \end{bmatrix} = [1, 0, 0, 0, 0, -L_1]^T \\ \xi_3 &= \begin{bmatrix} \omega_3 \\ r_3 \times \omega_3 \end{bmatrix} = [1, 0, 0, 0, 0, -L_1 - L_2]^T \end{aligned}$$

可得:

$$e^{\alpha \xi_1} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$e^{\beta \xi_2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & -\sin \beta & L_1(1 - \cos \beta) \\ 0 & \sin \beta & \cos \beta & L_1 \sin \beta \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$e^{\gamma \xi_3} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & -\sin \gamma & (L_1 + L_2)(1 - \cos \gamma) \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma & (L_1 + L_2) \sin \gamma \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

利用指数积公式, 可表示摆动腿足端位置在惯性坐标系下的变换关系:

$${}^S_T g(\alpha, \beta, \gamma) = e^{\alpha \xi_1} e^{\beta \xi_2} e^{\gamma \xi_3} {}^S_T g(0) \quad (2)$$

通过代入上面求得的参数, 可得到机器人单腿的运动学正解, 有足端位置向量  $\mathbf{P} = [p_x \ p_y \ p_z]^T$  为

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2(L_1 + L_2)s\alpha s\beta s\gamma - L_1 s\alpha - L_2 s\alpha s\beta - L_3 s\alpha c(\beta + \gamma) \\ -2(L_1 + L_2)c\alpha s\beta s\gamma + L_1 c\alpha + L_2 c\alpha c\beta + L_3 c\alpha c(\beta + \gamma) \\ 2(L_1 + L_2)c\beta s\gamma + 2L_1 s\beta + L_2 s\beta + L_3 s(\beta + \gamma) \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中,  $s* = \sin*$ ,  $c* = \cos*$ .

### 3.2 逆运动学分析

摆动腿的逆运动学求解是根据机器人本体的位姿  $g_0$  和足端在惯性坐标系  $\{S\}$  下的位置  $g_{OP}$ , 计算机器人摆动腿的全部驱动关节的角度值, 即  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\gamma$ . 根据逆运动学的指数积公式, 可得:

$$g(\alpha, \beta, \gamma) = e^{\alpha \xi_1} e^{\beta \xi_2} e^{\gamma \xi_3} \quad (4)$$

式中,  $g(\alpha, \beta, \gamma) = {}^S_T g(\alpha, \beta, \gamma) {}^S_T g^{-1}(0)$ .

为了简化驱动关节的角度  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\gamma$  的计算, 进行下列变换:

$$\begin{aligned} g(\alpha, \beta, \gamma) \mathbf{p} &= e^{\alpha \xi_1} e^{\beta \xi_2} e^{\gamma \xi_3} \mathbf{p} \\ &= e^{\alpha \xi_1} (e^{\beta \xi_2} e^{\gamma \xi_3} \mathbf{p}) = g_1(\alpha) \mathbf{q} \end{aligned}$$

式中,  $g_1(\alpha) = e^{\alpha \xi_1}$ ,  $\mathbf{q} = e^{\beta \xi_2} e^{\gamma \xi_3} \mathbf{p}$ ,  $\mathbf{p}$  为不在转动关节  $\xi_1$  轴线上的任意一点. 根据变量消元法, 应用距离不变原则<sup>[15]</sup>, 即给定一个运动旋量坐标为  $\xi = (\omega; \mathbf{r} \times \omega)$  的纯转动, 则不在转轴上的任意一点  $\mathbf{p}$  到转轴上的定点  $\mathbf{r}$  的距离保持不变, 可得:

$$\|g_1(\alpha) \mathbf{q} - \mathbf{r}\| = \|\mathbf{q} - \mathbf{r}\| \quad (5)$$

由此可以消去跟关节的关节变量  $\alpha$ , 即:

$$\|e^{\beta \xi_2} e^{\gamma \xi_3} \mathbf{p} - \mathbf{r}\| = \|g(\alpha, \beta, \gamma) \mathbf{p} - \mathbf{r}\| \quad (6)$$

式中右边是已知量, 通过代入相应的参数对方程进行求解, 可以先求出  $\alpha$ . 再根据  $e^{\beta \xi_2} e^{\gamma \xi_3} \mathbf{p} = \mathbf{q}$ , 可以求出  $\beta$  和  $\gamma$ , 即完成了机器人单腿的逆运动学求解. 通过对机器人单腿的逆运动学求解, 可以以此控制各腿的各个驱动关节的角度值来控制机器人本体的运动.

## 4 缓冲机构分析对比 (Analysis and comparison of buffer mechanisms)

传统的足式机器人的缓冲减震方式是在小腿和足端之间安装一个足端缓冲机构, 其本质是一个弹簧—阻尼系统的减震器, 与之相比, 本文提出的独立悬挂系统同样使用弹簧—阻尼系统进行缓冲, 但其安装位置以及作用方式完全不同. 因此, 有必要对 2 种缓冲机构的缓冲机理进行分析对比.

### 4.1 悬挂系统缓冲机理分析

本文提出的独立悬挂系统由 6 个安装在腿部的跟关节与髁关节之间的悬挂机构组成, 悬挂机构是由 2 个平行四边形机构和 1 个减震器组成. 当悬挂机构受到外力  $F_0$  时, 作用在连杆组件上的减震器会受压收缩, 如图 6 所示. 根据平行四边形机构特点, 其连杆在矢状面上做平动, 且在连杆方向上受力平衡, 可得连杆受到的减震器压力与连杆所受外力大小相等, 方向相反, 即:

$$f + F_0 = 0 \quad (7)$$

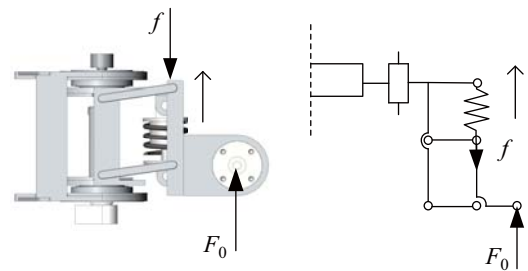


图 6 悬挂系统受力分析

Fig.6 Force analysis on the suspension system

上文已经分析了机器人的步行模式的运动机理. 机器人通过腿关节的转动, 可以实现腿构型的变化. 文 [16] 对轮腿式机器人的轮腿运动模式的切换进行了详细的分析研究, 其中包括步行变轮行以及轮行变步行 2 种切换规划. 对于具有悬挂系统的轮腿式机器人来说, 其构型与文 [16] 中的机器人构型类似, 因此轮腿切换的规划过程可参考文 [16].



通过对机器人进行轮腿切换规划, 可实现机器人在步行模式和轮行模式之间的切换。

机器人在轮行模式下的 3 维模型如图 7 所示, 机器人每条腿的构型一样, 对称分布在机身两侧。

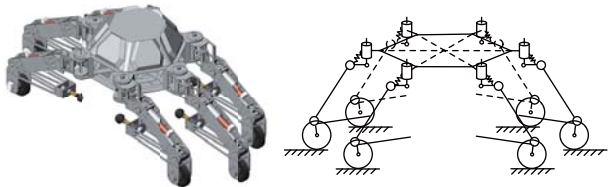


图 7 机器人轮行模式 3 维模型及机构简图

Fig.7 3-dimensional robot model and mechanism sketch in wheeled mode

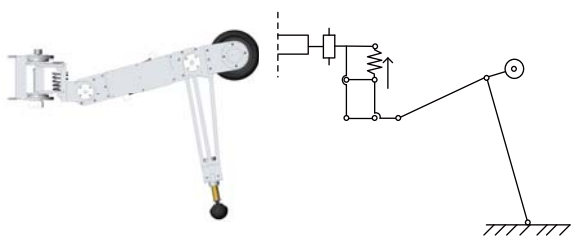


图 8 步行模式 1/6 机器人模型及其机构简图

Fig.8 1/6 robot model and mechanism sketch in walking mode

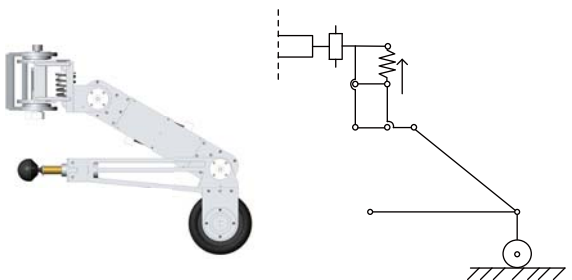


图 9 轮行模式 1/6 机器人模型及其机构简图

Fig.9 1/6 robot model and mechanism sketch in wheeled mode

为了研究机器人在步行模式和轮行模式下悬挂系统的缓冲机理, 参考车辆悬挂系统研究中的建模方法, 结合机器人特点进行改进应用。由于车辆采用的是独立悬挂系统, 单轮的悬挂系统相同且相互独立, 因此研究中普遍将整车系统简化成 1/4 车辆进行建模, 建立相应的单轮 2 自由度行驶振动模型来研究单轮悬挂系统的特性, 从而等效成整车悬挂系统的特性<sup>[17]</sup>。机器人的独立悬挂系统与车辆独立悬挂系统类似, 选取 1/6 机器人分支进行分析, 研究机器人单腿以及整体的悬挂系统的缓冲机理。其中, 机器人的步行模式和轮行模式下的模型图及其忽略足端缓冲机构时的机构简图如图 8 和 9 所示。

在机器人步行模式和轮行模式下, 在单腿受到地面反作用力使减震器受力压缩的过程中, 假设减震器对连杆的作用力方向始终垂直于本体沿连杆的方向。以机器人本体的垂直位移  $u_1$  为坐标, 建立

1/6 机器人分支在步行模式和轮行模式下悬挂系统的单自由度振动模型, 见图 10, 其中坐标原点选在机器人在重力作用下悬挂系统的平衡位置处。

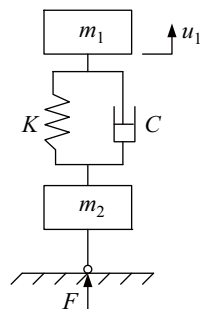


图 10 悬挂系统单自由度振动模型

Fig.10 Single-degree-of-freedom vibration model of the suspension system

图中,  $m_1$  为悬挂系统上端的质量, 即 1/6 本体质量;  $m_2$  为悬挂系统下端的质量, 即机器人单腿质量;  $K$  为减震器的弹簧刚度;  $C$  为减震器的阻尼系数;  $u_1$  为机器人本体的竖直方向的位移;  $F$  为地面对机器人足端的反作用力。

在机器人静态支撑平衡位置处, 根据受力分析及胡克定律可得:

$$\begin{cases} F - (m_1 + m_2)g = 0 \\ m_1g = K\Delta u_1 \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $\Delta u_1$  为减震器的变化量。可解得, 在平衡位置处, 减震器相比其自然伸直状态下的压缩量为  $\Delta u_1 = m_1g/K$ , 地面对足端的反作用力为  $F = (m_1 + m_2)g$ 。

由于机器人在步行模式和轮行模式下的运动方式是不同的, 可以根据以上单自由度振动模型, 对轮腿式机器人在这 2 种运动模式下悬挂系统的缓冲机理进行分析。

#### 4.1.1 步行模式悬挂系统缓冲机理

机器人在步行模式下的运动是通过单腿的交替摆动和支撑来实现的。如图 11 所示, 在摆腿过程中, 足端没有受到地面对其的反作用力, 此时的悬挂机构处于自然伸直状态, 假设单腿在向下摆的过程中整体竖直方向下的触地速度为  $v_0$ , 并选取足端与地面接触瞬间为初始时刻。

在触地过程中, 对于单腿质量块  $m_2$ , 假设其与地面接触过程为完全非弹性碰撞, 碰撞时间为  $t_0$ , 即单腿足端在碰撞过程中始终与地面接触。在  $0 \sim t_0$ , 根据动量定理, 可得:

$$Ft_0 = m_2(0 - (-v_0)) \quad (9)$$

可解得单腿质量块  $m_2$  受到地面对其的平均冲击力为  $F = m_2 v_0 / t_0$ , 即在运动过程中地面会对单腿产生直接的运动冲击, 与单腿触地速度以及碰撞时间有关.

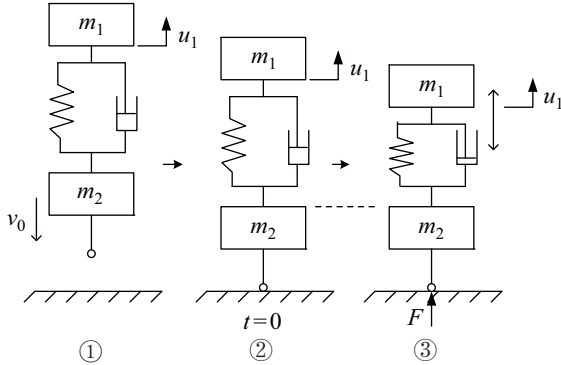


图 11 步行模式下单腿足地接触过程

Fig.11 Foot-ground contact process of a leg in walking mode

对于本体质量块  $m_1$ , 利用牛顿第二定律, 可以得出悬挂机构的振动微分方程为

$$m_1 \ddot{u}_1 + C \dot{u}_1 + K u_1 = 0 \quad (10)$$

其中, 方程的初始条件为  $u_1(0) = \Delta u_1 = m_1 g / K$ ,  $\dot{u}_1(0) = -v_0$ .

解式 (10), 可得方程的解:

$$u_1(t) = e^{-\varepsilon \omega_0 t} \left( \frac{m_1 g}{K} \cos \Omega t + \frac{\varepsilon \omega_0 m_1 g / K - v_0}{\Omega} \sin \Omega t \right) \quad (11)$$

式中,  $\omega_0^2 = K / m_1$ ,  $\varepsilon = C / 2 \omega_0 m_1$ ,  $\Omega = \omega_0 \sqrt{1 - \varepsilon^2}$ .

表 1 机器人设计参数

Tab.1 Parameters for robot design

参数	数值
1/6 本体质量 $m_1$ /kg	5
单腿质量 $m_2$ /kg	5
减震器刚度 $K$ /(N/m)	2000
减震器阻尼系数 $C$ /(N·s/m)	50

如表 1 所示, 给定相应的参数, 可以得出在不同的初始速度下方程的解  $u_1$  的图像. 为了研究本体在竖直方向上的受力情况, 可以研究本体的加速度变化情况, 如图 12 和 13 所示.

通过对上述图像的分析可得, 对于相同的减震器、不同的触地速度, 本体的振动频率不同, 本体初始时刻的加速度相同. 触地速度  $v_0$  越大, 本体的振动频率越大, 振幅也越大, 且振动过程中本体的加速度也越大, 并在一定时间内振幅和加速度减小而到达平衡状态.

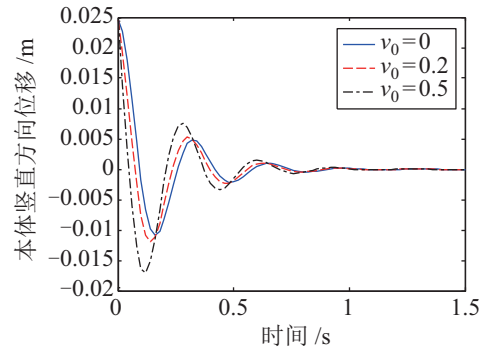


图 12 步行模式下机器人本体在竖直方向上的位移

Fig.12 Robot body displacement in vertical direction in walking mode

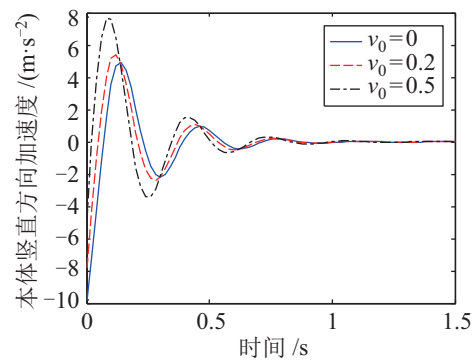


图 13 步行模式下机器人本体在竖直方向上的加速度

Fig.13 Robot body acceleration in vertical direction in walking mode

#### 4.1.2 轮行模式悬挂系统缓冲机理

轮腿式机器人在轮行模式下的运动与在步行模式下的运动不同, 机器人单腿的轮子始终与地面接触. 文 [16] 对轮腿式机器人的轮式运动学进行了详细的分析研究, 其中包括对机器人轮行模式下前进和转向等情况的分析. 本文在此基础上, 增加了悬挂系统, 为了研究轮行模式下的悬挂系统缓冲机理, 需要分析机器人在不平坦地面上的运动.

当机器人在不平坦的地面上做轮行运动时, 其振动模型运动情况如图 14 所示, 其中  $q$  为路面不平度输入.

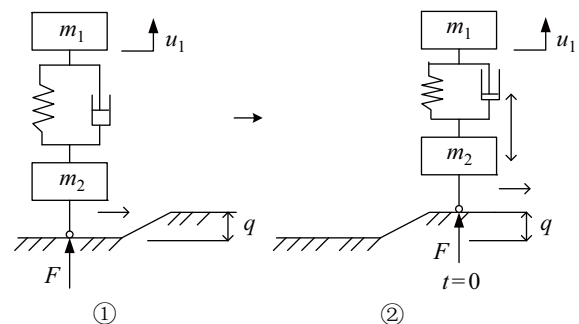


图 14 机器人轮行过程

Fig.14 Wheeled motion process of the robot

假设在初始时刻, 机器人遇到一段不平度为  $q$  的路面, 即此时悬挂系统相比平衡状态有一个  $q$  的形变, 利用牛顿第二定律, 可得出机器人本体的振动微分方程:

$$m_1 \ddot{u}_1 + C \dot{u}_1 + K u_1 = 0 \quad (12)$$

其中, 方程的初始条件为  $u_1(0) = -q$ ,  $\dot{u}_1(0) = 0$ .

通过式 (12), 可得方程的解:

$$u_1(t) = -e^{-\varepsilon \omega_0 t} \left( q \cos \Omega t + \frac{\varepsilon \omega_0 q}{\Omega} \sin \Omega t \right) \quad (13)$$

式中,  $\omega_0^2 = K/m_1$ ,  $\varepsilon = C/2\omega_0 m_1$ ,  $\Omega = \omega_0 \sqrt{1 - \varepsilon^2}$ .

同样根据表 1 的参数, 可以得出在路面不平度  $q$  不同的情况下方程的解  $u_1$  的图像. 为了研究本体在竖直方向上的受力情况, 可以研究本体的加速度变化情况, 如图 15 和 16 所示.

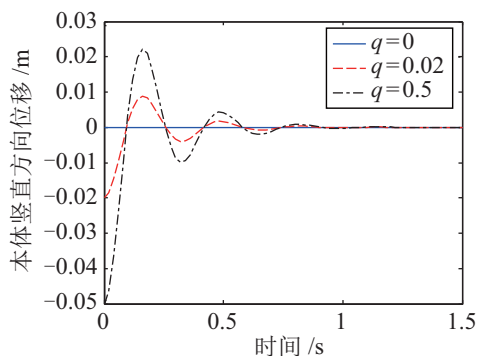


图 15 轮行模式下机器人本体在竖直方向上的位移

Fig.15 Robot body displacement in vertical direction in wheeled mode

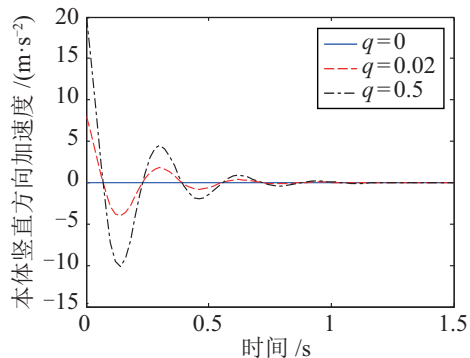


图 16 轮行模式下机器人本体在竖直方向上的加速度

Fig.16 Robot body acceleration in vertical direction in wheeled mode

通过对上述图像的分析可得, 机器人在轮行模式下的运动过程中, 对于不同的路面不平度  $q$ , 本体的振动频率是相同的, 但初始时刻本体加速度不同. 地面不平度  $q$  越大, 本体振动的振幅越大, 其初始加速度也越大, 并会在一定时间内振幅和加速度减小而到达平衡状态.

## 4.2 足端缓冲机构缓冲机理分析

轮腿式机器人只有在步行模式下足端才会与地面接触, 在轮行模式下足端与地面是分离的, 所以足端缓冲机构只有在步行模式下才会有缓冲效果. 同样选取忽略了悬挂系统的 1/6 机器人进行分析并构建相应的振动模型. 根据机器人的机构简图, 以机器人单腿的小腿方向的位移  $u_2$  为坐标, 建立 1/6 机器人分支足端缓冲机构的单自由度振动模型, 如图 17 所示. 其中, 坐标原点选在机器人在重力作用下足端缓冲机构的平衡位置处. 图中,  $\varphi$  为机器人小腿与地面反作用力方向的夹角.

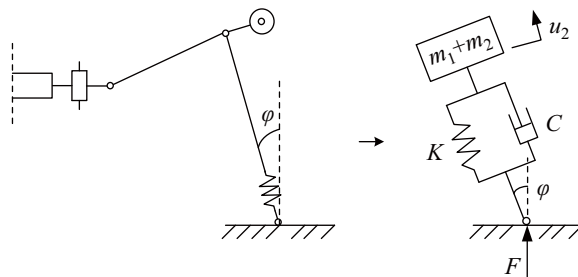


图 17 1/6 机器人机构简图及其单自由度振动模型

Fig.17 1/6 robot mechanism sketch and its single-degree-of-freedom vibration model

在静态平衡位置处, 根据受力分析及胡克定律可得:

$$\begin{cases} F - (m_1 + m_2)g = 0 \\ (m_1 + m_2)g \cos \varphi = K \Delta u_2 \end{cases} \quad (14)$$

式中,  $\Delta u_2$  为足端缓冲机构的减震器的变化量. 可解得, 在平衡位置处, 减震器相比其自然伸直状态下的压缩量为  $\Delta u_2 = (m_1 + m_2)g \cos \varphi / K$ , 地面对足端的反作用力为  $F = (m_1 + m_2)g$ .

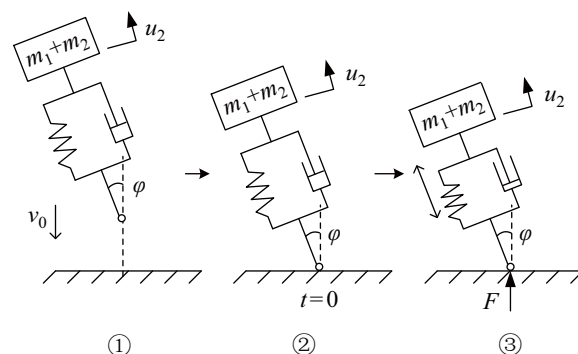


图 18 具有足端缓冲机构单腿足地接触过程

Fig.18 Foot-ground contact process of a leg with a foot buffer mechanism

同样, 机器人在步行模式下在摆腿过程中, 由于足端没有受到地面对其的反作用力, 此时的足端缓冲机构处于自然伸直状态. 如图 18 所示, 假设

单腿在向下摆的过程中在竖直方向上的整体触地速度为  $v_0$ ，并选取足端刚接触瞬间为初始时刻。

在触地过程中，对于 1/6 机器人分支来说，足端缓冲机构只能对地面沿着小腿方向的冲击力  $F_2$  进行缓冲，不能对垂直于小腿方向的冲击力  $F_1$  进行缓冲，如图 19 所示。

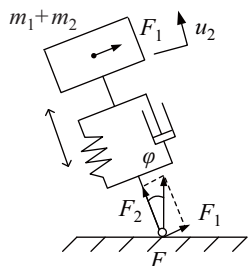


图 19 足—地碰撞过程受力分析

Fig.19 Force analysis on foot-ground collision

假设足端与地面接触过程为完全非弹性碰撞，碰撞时间为  $t_0$ ，即单腿足端在碰撞过程中始终与地面接触。在  $0 \sim t_0$  过程，对垂直于小腿方向的动量进行分析，根据动量定理，可得：

$$F_1 t_0 = (m_1 + m_2)(0 - (-v_0 \sin \varphi)) \quad (15)$$

可解得机器人受到地面对其在垂直于小腿方向上的平均冲击力为  $F_1 = (m_1 + m_2)v_0 \sin \varphi / t_0$ ，即机器人在  $0 \sim t_0$  的运动过程中地面会直接对其产生垂直于小腿方向的运动冲击，与单腿触地速度、碰撞时间以及小腿与竖直方向的夹角有关。

利用牛顿第二定律，可以得出足端缓冲机构沿着小腿方向的振动微分方程为

$$(m_1 + m_2)\ddot{u}_2 + C\dot{u}_2 + Ku_2 = 0 \quad (16)$$

其中，方程的初始条件为  $u_2(0) = \Delta u_2 = (m_1 + m_2)g \cos \varphi / K$ ， $\dot{u}_2(0) = -v_0 \cos \varphi$ 。

解式 (16)，可得出方程的解：

$$u_2(t) = e^{-\varepsilon \omega_0 t} \left( u_{20} \cos \Omega t + \frac{\varepsilon \omega_0 u_{20} - v_0 \cos \varphi}{\Omega} \sin \Omega t \right) \quad (17)$$

式中， $u_{20} = (m_1 + m_2)g \cos \varphi / K$ ， $\omega_0^2 = K / m_1$ ， $\varepsilon = C / 2\omega_0 m_1$ ， $\Omega = \omega_0 \sqrt{1 - \varepsilon^2}$ 。

同样根据表 1 的参数，设触地速度为 0.2 m/s，可以得出在不同的小腿与竖直方向夹角下方程的解  $u_2$  的图像。为了研究本体沿小腿方向的受力情况，可以研究本体沿小腿方向的加速度变化情况，如图 20 和 21 所示。

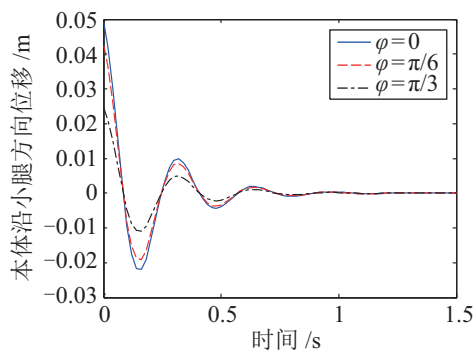


图 20 带足端缓冲机构的机器人本体沿小腿方向的位移

Fig.20 Robot body displacement in shin direction with a foot buffer mechanism

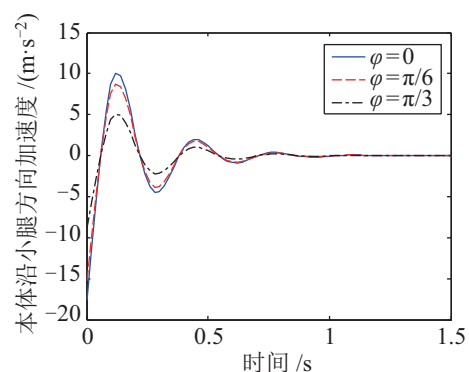


图 21 带足端缓冲机构的机器人本体沿小腿方向的加速度

Fig.21 Robot body acceleration in shin direction with a foot buffer mechanism

在机器人触地过程中其竖直方向的加速度可以分成 2 个阶段： $0 \sim t_0$  以及  $t_0$  之后，可表示为

$$u_y(t) = \begin{cases} u_2(t) \cos \varphi + F_1 \sin \varphi / (m_1 + m_2), & 0 \leq t \leq t_0 \\ u_2(t) \cos \varphi, & t > t_0 \end{cases} \quad (18)$$

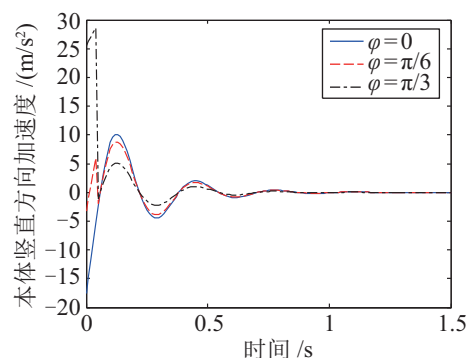


图 22 带足端缓冲机构的机器人本体沿竖直方向的加速度

Fig.22 Robot body acceleration in vertical direction with a foot buffer mechanism

假设碰撞时间  $t_0 = 0.1$  s，可以得出在小腿与地面反作用力方向的夹角变化的情况下，触地过程中机器人在竖直方向上的加速度的图像，如图 22 所



示. 在夹角  $\varphi$  为 0 时, 相当于地面对足端的冲击力完全由足端缓冲机构进行缓冲. 当夹角逐渐增大时, 缓冲机构的缓冲效果逐渐减弱, 机器人受到触地碰撞过程的冲击力则越来越大. 因此, 机器人足端缓冲机构对本体的缓冲效果与触地时小腿与地面反作用力方向的夹角有关, 夹角越大, 缓冲效果越差, 机器人受到的运动冲击越大.

## 5 机器人运动仿真 (Robot motion simulation)

为了验证轮腿式机器人的独立悬挂系统的作用效果, 利用机械系统动力学仿真软件 ADAMS 对其进行运动仿真分析. 通过将机器人 3 维模型导入 ADAMS 的仿真环境中, 并添加质量、运动约束及驱动等, 建立虚拟样机, 然后分别对机器人的步行模式和轮行模式进行运动仿真. 在步行模式下, 仿真分析以下 4 种情况: ① 机器人没有独立悬挂系统和足端缓冲机构; ② 机器人只有独立悬挂系统; ③ 机器人只有足端缓冲机构; ④ 机器人有独立悬挂系统及足端缓冲机构. 由于足端缓冲机构在轮行模式下并不会与地面产生相互作用, 所以在轮行模式下, 仿真分析以下 2 种情况: ① 机器人没有独立悬挂系统; ② 机器人装有独立悬挂系统. 另外, 通过对地面情况进行设置, 分别在平坦和崎岖的地面情况下进行上述的运动仿真分析, 从而综合对比分析轮腿式机器人的独立悬挂系统和足端缓冲机构的作用效果.

### 5.1 步行模式运动仿真

轮腿式机器人在步行模式下的运动是通过各条腿的协调运动来实现的, 机器人步态是指机器人的每条腿按一定顺序和轨迹运动的过程<sup>[18]</sup>. 对于六足机器人来说, 常见的规则步态有“3+3”步态、“4+2”步态以及“5+1”步态<sup>[19]</sup>. 在六足机器人步行模式中, “3+3”步态是常用也是行走速度最快的步态, 因此采用该步态进行仿真分析.

设本体的移动速度为 0.15 m/s, 为了保持本体的匀速移动, 如式 (19) 所示对足端进行运动规划, 图 23 为对应的足端轨迹曲线, 图 24 为运动仿真过程中足末端的轨迹曲线.

$$\begin{cases} p_x = \frac{\lambda}{2} \cos(\omega_0 t), & 0 \leq t \leq 2T \\ p_y = S_0, & 0 \leq t \leq 2T \\ p_z = \begin{cases} h_{\max} \sin(\omega_0 t) - H, & 0 \leq t < T \\ -H, & T \leq t \leq 2T \end{cases} \end{cases} \quad (19)$$

式中,  $\omega_0$  为步行频率,  $\omega_0 = \pi/T$ ;  $\lambda$  为步长;  $h_{\max}$

为足端最大抬起高度,  $S_0$  为足端与本体的横向距离,  $H$  为机器人本体高度, 与机器人腿的结构有关. 在仿真中, 取  $T = 2$ ,  $\lambda = 300$  mm,  $h_{\max} = 150$  mm.

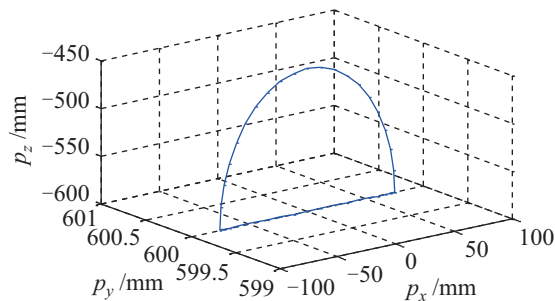


图 23 足端运动轨迹

Fig.23 Foot motion trajectory



图 24 仿真过程中足端运动轨迹

Fig.24 Foot trajectory in simulation

在机械系统动力学仿真软件 ADAMS 里, 根据足端轨迹规划, 利用 ADAMS 里的 SPLINE 曲线和 AKISPL 函数, 可以求其运动学逆解, 得到运动过程中 6 条腿的跟关节、髌关节和膝关节的驱动角度, 如图 25 ~ 27 所示.

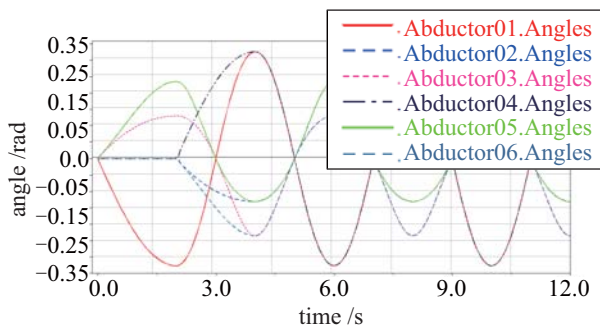


图 25 6 条腿跟关节的驱动角度

Fig.25 Driving angles of 6 abductor joints

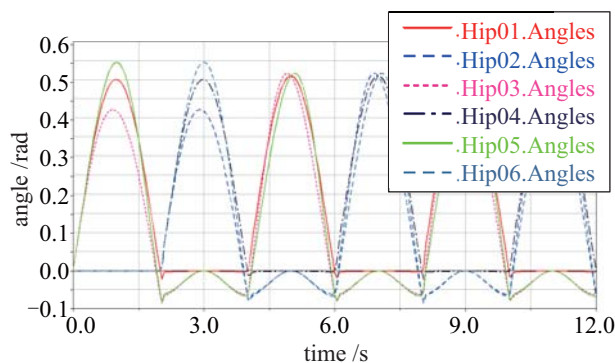


图 26 6 条腿髌关节的驱动角度

Fig.26 Driving angles of 6 hip joints

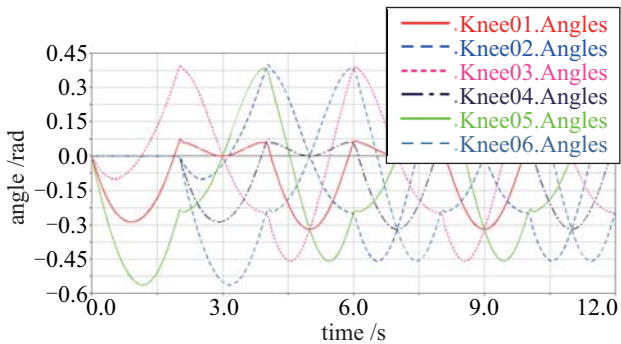


图 27 6 条腿膝关节的驱动角度  
Fig.27 Driving angles of 6 knee joints

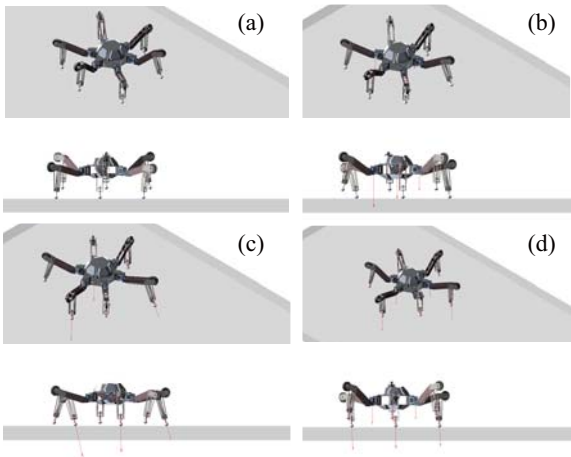


图 28 平地环境步行模式仿真  
Fig.28 Walking simulation on the flat

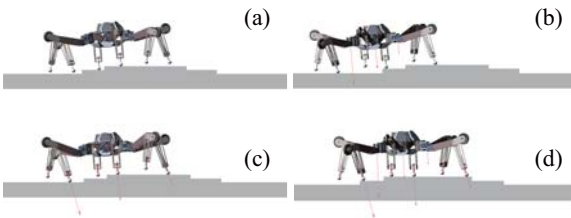


图 29 崎岖地形步行模式仿真  
Fig.29 Walking simulation on the uneven ground

根据上述机器人各关节的驱动角度，进行机器人运动仿真。在平地环境和崎岖环境下分别对 4 种情况进行机器人运动仿真，仿真过程如图 28 和 29 所示。机器人本体在竖直方向上的加速度从侧面体现了机器人本体所受外力的变化，在平地环境和崎岖环境下 4 种情况下本体在竖直方向上的加速度变化如图 30 和 31 所示。

从图 30 可以看出，在平地环境下，机器人的悬挂系统及足端缓冲机构均可以对机器人本体起到缓冲减震的作用，两者的缓冲效果相当，其本体受到的运动冲击约为没有缓冲机构时所受到的运动冲击的 1/3，并且在同时采用两者的情况下具有更好

的缓冲效果。

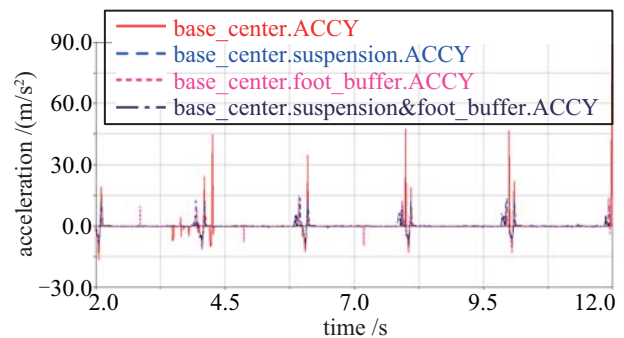


图 30 机器人平地环境步行时本体竖直方向加速度  
Fig.30 Robot body acceleration in vertical direction on the flat in walking mode

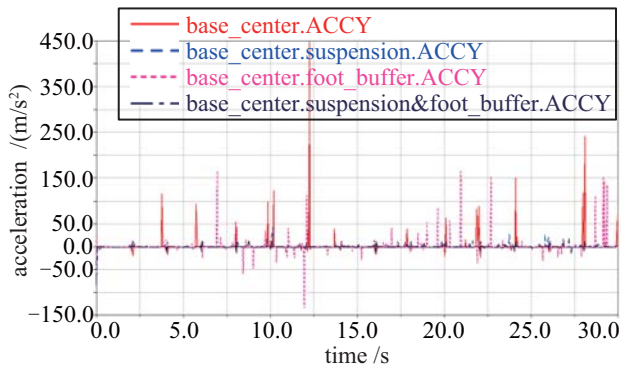


图 31 机器人崎岖环境步行时本体竖直方向加速度  
Fig.31 Robot body acceleration in vertical direction on the uneven ground in walking mode

从图 31 可得，在崎岖环境下运动，机器人本体会受到更大的运动冲击，其中机器人的悬挂系统具有良好的缓冲减震作用，其本体受到的运动冲击约为没有缓冲机构时受到的运动冲击的 1/10 左右。而足端缓冲机构的缓冲效果受地形影响较大，缓冲作用较差。在同时采用悬挂系统和足端缓冲机构的情况下缓冲效果更好。

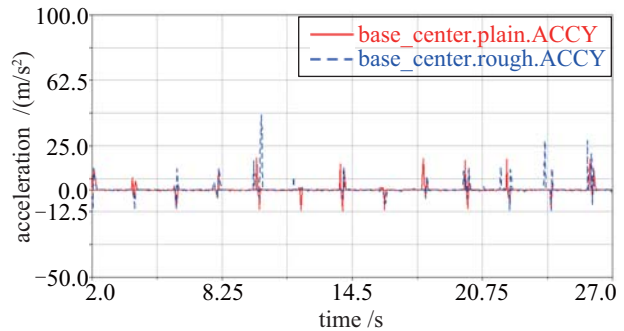


图 32 有悬挂系统时机器人本体在竖直方向上的加速度对比  
Fig.32 Comparison of robot body acceleration in vertical direction with suspension system

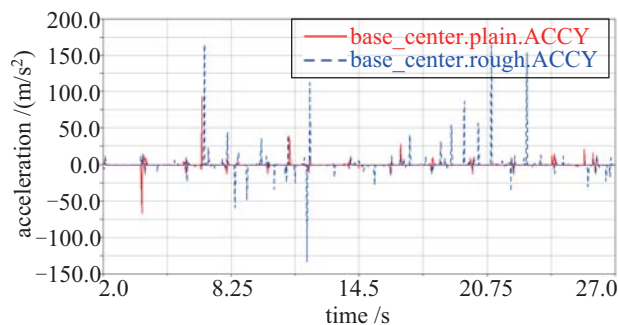


图 33 有足端缓冲机构时机器人本体在竖直方向上的加速度对比

Fig.33 Comparison of robot body acceleration in vertical direction with foot buffer mechanism

为了进一步研究悬挂系统和足端缓冲机构受地形影响的情况, 分析在有悬挂系统和有足端缓冲机构的情况下机器人本体在平地 and 崎岖地形下的竖直方向加速度情况, 如图 32 和 33 所示。

分析图 32 和 33 可得, 在不同的地形条件下, 悬挂系统的缓冲效果变化不大, 都具有良好的缓冲效果, 而足端缓冲机构的缓冲效果则相差许多, 崎岖环境下缓冲效果比平地条件下缓冲效果要差。结合上文对两者的缓冲机理分析可知, 足端缓冲机构的缓冲效果与小腿与竖直方向的夹角有关, 在高低不平崎岖环境下, 在不同立足点处, 足触地瞬间小腿与竖直方向的夹角与地形有关, 夹角越大, 缓冲效果越差。因此, 足端缓冲机构的缓冲效果受地形影响较大, 而悬挂系统的缓冲效果则与地形环境关系不大。

## 5.2 轮行模式运动仿真

由于机器人轮行模式下足端并不会与地面接触, 所以足端缓冲机构不存在缓冲效果。因此, 轮行模式下仿真分为在平地 and 崎岖地面上机器人有悬挂系统和无悬挂系统的运动情况。在平地环境和崎岖环境下的仿真过程如图 34 所示, 在平地环境和崎岖环境下本体在竖直方向上的加速度变化如图 35 和 36 所示。

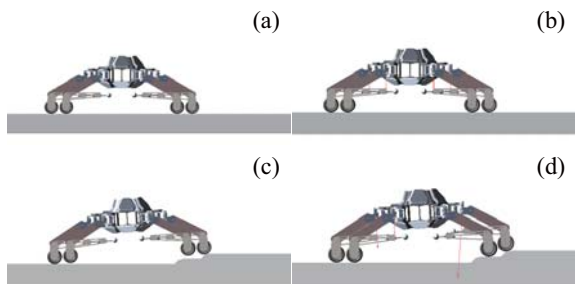


图 34 机器人在平地环境及崎岖环境下的轮行模式仿真

Fig.34 Wheeled motion simulation on the flat and the uneven ground

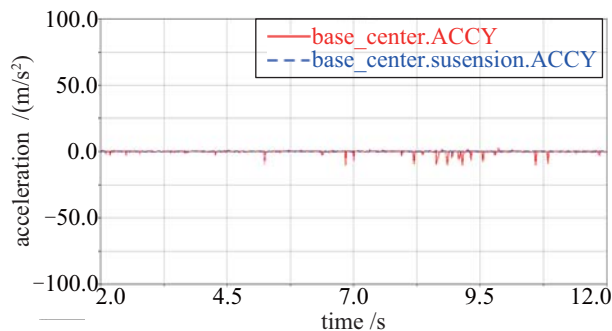


图 35 机器人在平地环境轮行时本体在竖直方向上的加速度

Fig.35 Robot body acceleration in vertical direction on the flat in wheeled mode

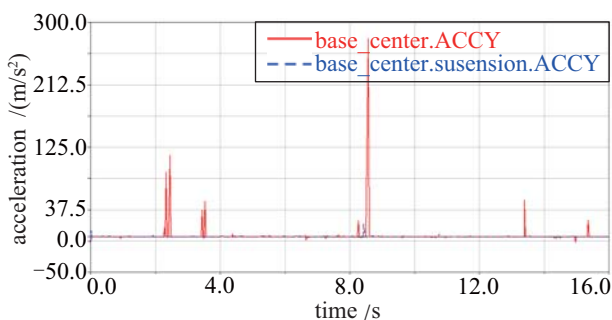


图 36 机器人在崎岖地面轮行时本体在竖直方向上的加速度

Fig.36 Robot body acceleration in vertical direction on the uneven ground in wheeled mode

从图 35 可以看出, 在平地环境下, 机器人在轮行模式下运动, 有、无悬挂系统情况下本体在竖直方向上的加速度都约为 0, 这与上文对悬挂系统缓冲机理的分析中地面平整度  $q$  为 0 的情况相一致。从图 36 可以看出, 在崎岖环境下进行轮行运动时, 有悬挂系统的机器人的轮子与地面更加贴合, 与无悬挂系统的情况相比, 其本体在竖直方向上的加速度更小, 受到的运动冲击也小许多, 验证了悬挂系统在轮行模式下的缓冲减震效果。

## 6 结论 (Conclusion)

1) 设计了一种具有独立悬挂系统和足端缓冲机构的六足轮腿式机器人, 该机器人在步行模式与轮行模式下运动, 其悬挂系统对机器人本体均起到缓冲减震的作用。

2) 构建了悬挂系统机构和足端缓冲机构的单自由度振动模型, 分析对比了 2 种机构的缓冲机理, 得出在步行模式下足端缓冲机构的缓冲效果与地形环境有关, 触地过程中小腿与竖直方向夹角越大, 其缓冲效果越差; 悬挂系统的缓冲效果则不受地形环境的影响。



3) 分别对无缓冲机构、装有悬挂系统、装有足端缓冲机构、装有悬挂系统及足端缓冲机构的4种机器人模型进行了步行运动仿真,验证了振动模型及缓冲机理分析的正确性,得出了悬挂系统及足端缓冲机构相结合的设计会比单一缓冲机构的设计在运动中有更好的缓冲减震效果。

4) 具有独立悬挂系统的六足轮腿式机器人在不同地形环境下的运动过程中,其本体内部环境受到的运动冲击较小,具有良好的稳定性,可在本体内部装载各种设备或精密仪器,使其作为特种机器人在复杂环境中执行各种任务。

### 参考文献 (References)

- [1] Raibert M, Blankespoor K, Nelson G, et al. BigDog, the rough-terrain quadruped robot[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2008, 41(2): 10822-10825.
- [2] Zhuang H C, Gao H B, Ding L, et al. Method for analyzing articulated torques of heavy-duty six-legged robot[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 26(4): 801-812.
- [3] Nakajima S, Nakano E, Takahashi T. Motion control technique for practical use of a leg-wheel robot on unknown outdoor rough terrains[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, USA: IEEE, 2004: 1353-1358.
- [4] Muller J, Schneider M, Hiller M. Modeling, simulation, and model-based control of the walking machine ALDURO[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2000, 5(2): 142-152.
- [5] Wilcox B H. ATHLETE: An option for mobile lunar landers [C]//2008 IEEE Aerospace Conference. Piscataway, USA: IEEE, 2008: 2711-2718.
- [6] 徐坤, 丁希仑, 李可佳. 圆周对称分布六腿机器人三种典型行走步态步长及稳定性分析[J]. 机器人, 2012, 34(2): 231-241, 256.  
Xu K, Ding X L, Li K J. Stride size and stability analysis of a radially symmetrical hexapod robot in three typical gaits[J]. Robot, 2012, 34(2): 231-241, 256.
- [7] 田娜, 丁希仑, 戴建生. 一种新型的变结构轮/腿式探测车机构设计与分析[J]. 机械设计与研究, 2004, 20(z1): 268-270.  
Tian N, Ding X L, Dai J S. Design and analysis of a novel metamorphic wheel-legs rover mechanism[J]. Journal of Machine Design and Research, 2004, 20(z1): 268-270.
- [8] 张俊红, 洪刘生, 杨文钊, 等. 车辆悬架系统及其性能评价综述[J]. 机械设计与研究, 2015(6): 147-153.  
Zhang J H, Hong L S, Yang W Z, et al. Review of technique application and performance evaluation for the vehicle suspension system[J]. Machine Design and Research, 2015(6): 147-153.
- [9] 张智谦, 倪建华, 张陵. 不同路况下车辆悬架系统的动态特性研究[J]. 机械科学与技术, 2000(s1): 33-35.  
Zhang Z Q, Ni J H, Zhang L. The dynamic characteristic of vehicle suspension system under the different surfaces of the road[J]. Mechanical Science and Technology, 2000(s1): 33-35.
- [10] 吴家敏, 何俐萍, 曾易寒, 等. 一种机器人车体悬挂系统: 中国, CN201610853167.1[P]. 2017-02-22.
- Wu J M, He L P, Zeng Y H, et al. A kind of suspension on the robot vehicle body: China, CN201610853167.1[P]. 2017-02-22.
- [11] 丁希仑, 徐坤. 一种新型变结构轮腿式机器人的设计与分析[J]. 中南大学学报, 2009, 40(s1): 91-101.  
Ding X L, Xu K. Design and analysis of a novel metamorphic wheel-legged rover mechanism[J]. Journal of Central South University, 2009, 40(s1): 91-101.
- [12] 庄红超, 高海波, 邓宗全, 等. 电驱动重载六足机器人关节转速分析方法[J]. 机械工程学报, 2013, 49(23): 44-52.  
Zhuang H C, Gao H B, Deng Z Q, et al. Method for analyzing articulated rotating speeds of heavy-duty six-legged robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(23): 44-52.
- [13] Peng S J, Ding X L, Yang F, et al. Motion planning and implementation for the self-recovery of an overturned multi-legged robot[J]. Robotica, 2017, 35(5): 1107-1120.
- [14] 邓宗全, 刘逸群, 高海波, 等. 液压驱动六足机器人步行腿节段长度比例研究[J]. 机器人, 2014, 36(5): 544-551.  
Deng Z Q, Liu Y Q, Gao H B, et al. On the segment length ratio of the walking leg of a hydraulically actuated hexapod robot[J]. Robot, 2014, 36(5): 544-551.
- [15] 于靖军, 刘辛军, 丁希仑. 机器人机构学的数学基础[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2016: 81-84.  
Yu J J, Liu X J, Ding X L. Mathematic foundation of mechanisms and robotics[M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2016: 81-84.
- [16] 徐坤, 郑羿, 丁希仑. 六轮腿式机器人结构设计与运动模式分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(1): 59-71.  
Xu K, Zheng Y, Ding X L. Structure design and motion mode analysis of a six wheel-legged robot[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2016, 42(1): 59-71.
- [17] 周长城, 潘礼军, 于曰伟, 等. 车辆钢板弹簧悬架系统减振器最佳阻尼匹配[J]. 农业工程学报, 2016, 32(7): 106-113.  
Zhou C C, Pan L J, Yu Y W, et al. Optimal damping matching for shock absorber of vehicle leaf spring suspension system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(7): 106-113.
- [18] 苏军, 陈学东, 田文罡. 六足步行机器人全方位步态的研究[J]. 机械与电子, 2004(3): 48-52.  
Su J, Chen X D, Tian W G. A study of the omnidirectional gait for a hexapod walking robot[J]. Machinery & Electronics, 2004(3): 48-52.
- [19] 丁希仑, 王志英, Rovetta A. 六边形对称分布六腿机器人的典型步态及其运动性能分析[J]. 机器人, 2010, 32(6): 759-765.  
Ding X L, Wang Z Y, Rovetta A. Typical gaits and motion analysis of a hexagonal symmetrical hexapod robot[J]. Robot, 2010, 32(6): 759-765.

### 作者简介:

- 潘希祥 (1992-), 男, 硕士生. 研究领域: 仿生机器人, 机器人结构设计.
- 徐坤 (1981-), 男, 博士, 讲师. 研究领域: 仿生机器人, 可展机构, 机器人控制.
- 王耀兵 (1972-), 男, 博士, 研究员. 研究领域: 空间机器人, 柔性机械臂.