

# 一种轮足复合式爬壁机器人机构建模与分析

刘爱华<sup>1,2</sup>, 王洪光<sup>1</sup>, 房立金<sup>1</sup>, 姜 勇<sup>1</sup>

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所机器人国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110016; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 基于行星轮系运动及双足真空吸附原理, 提出了一种新型爬壁机器人机构, 介绍了机构的构型及结构特点, 推导了运动学方程, 分析了沿直线行走、平面旋转和跨越交叉壁面三种运动模式. 仿真结果表明该机构具有移动速度快、运动灵活、跨越交叉壁面能力强等特点.

**关键词:** 爬壁机器人; 行星轮系; 真空吸附

**中图分类号:** TP24

**文献标识码:** B

## Modeling and Analysis of a Biped-Wheel Wall-climbing Robot Mechanism

LIU Ai-hua<sup>1,2</sup>, WANG Hong-guang<sup>1</sup>, FANG Li-jin<sup>1</sup>, JIANG Yong<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** A novel wall-climbing robot mechanism is presented based on planetary gear train movement and biped vacuum suction principle. Its configuration and structure characteristics are introduced and kinematics equations are derived. Three locomotion modes of moving straight, turning in plane and traversing cross-wall are described respectively. Simulation results prove that the mechanism has such features as rapid moving speed, excellent maneuverability and strong ability of traversing cross-wall.

**Keywords:** wall-climbing robot; planetary gear train; vacuum suction

### 1 前言 (Introduction)

爬壁机器人是特种机器人的一个分支, 主要应用于核工业、石化企业、建筑行业和造船业等<sup>[1]</sup>. 按照爬壁机器人的移动功能可以划分为轮式、履带式 and 腿足式, 其中轮式爬壁机器人具有移动速度快、机动性强的优点, 但是仅适应较为平整的壁面, 并且越障能力差, 如 Longo 等提出的 Alica 负压轮式爬壁机器人<sup>[2]</sup>, 哈尔滨工业大学研究的 CLR-1 机器人<sup>[3]</sup>等; 履带式爬壁机器人多采用磁吸附原理, 移动速度快, 负载能力强, 但是仅适用具有导磁性的壁面, 如哈尔滨工业大学研究的磁吸附履带式壁面爬行机器人<sup>[3]</sup>; 腿足式机器人结构多样、运动灵活、越障能力强, 但是机器人移动速度较慢, 控制也相对复杂, 如 Ryu 等提出的仿生六足爬壁机器人 MRWALLSPECT II<sup>[4]</sup>, Luk 等提出的仿生四足爬壁机器人 Robug II<sup>[5]</sup>, Xiao 等研究的两足欠驱动爬壁机器人 crawler<sup>[6]</sup>.

在轮式和腿足式爬壁机器人研究的基础上, 基

于行星轮系运动及双足真空吸附原理, 结合轮式机构移动速度快和腿足式机构越障能力强的优点, 提出了一种新型的轮足复合式爬壁机器人机构. 介绍了这种轮足复合式机构的构型及结构特点, 建立了运动学模型, 并在此基础上分析了直线行走、平面旋转和跨越交叉壁面三种基本运动模式, 最后对机构的运动和越障过程进行仿真验证.

### 2 机器人机构组成 (Mechanism configuration of the robot)

如图 1 所示, 机器人由系杆、两个半圆柱体和两个吸盘足组成, 两个半圆柱体外表面形成外啮合齿轮副, 在其回转中心处通过转动副由系杆连接. 如图 2 所示, 机器人机构具有 4 个自由度, 由 4 个旋转关节和 1 个移动关节组成. 其中, 旋转关节  $J_2$  和  $J_3$  沿水平方向放置, 通过电机 2 驱动  $J_2$  实现两个半圆柱体的相对滚动; 旋转关节  $J_1$  和  $J_4$  沿垂直方向放置, 分别由电机 1 和电机 3 驱动, 可分别单独实

现机器人的平面旋转. 移动关节 5 沿垂直方向放置, 由电机 4 驱动, 实现吸盘足 2 的伸长或收缩, 协助机器人实现交叉壁面的跨越.

双足采用真空吸附方式, 两个吸盘足分别与半圆柱体连接, 吸盘足 1 通过旋转关节  $J_1$  与半圆柱体 1 连接, 吸盘足 2 通过移动关节  $J_5$  和旋转关节  $J_4$  与半圆柱体 2 连接. 系杆通过旋转关节  $J_2$  和  $J_3$  连接两个外啮合的半圆柱体, 三者共同构成行星轮系. 机器人采用非对称运动关节设计, 将运动和姿态调整复合, 结构紧凑, 减少了电机的数量, 进而减小了机器人的体积和重量.

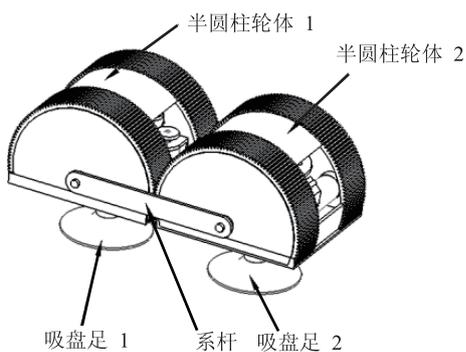


图 1 机构示意图

Fig.1 The mechanism schematic

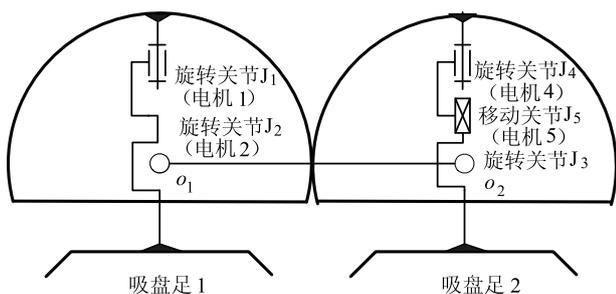


图 2 机器人机构简图

Fig.2 Sketch of the robot mechanism

### 3 运动学分析 (Kinematics analysis)

#### 3.1 建立 D-H 坐标

爬壁机器人在壁面运动过程中要求至少有一个吸盘足吸附工作壁面, 由于机器人采用非对称的结构设计, 因此在空间中建立机器人运动学坐标系时可以分为左吸盘足吸附支撑和右吸盘足吸附支撑两种情况. 本文仅以左吸盘足吸附支撑的情况为例加以分析, 右吸盘足吸附支撑的情况可以类推. 各连杆坐标系的设定如图 3 所示.

以左吸盘足的中心为圆心建立参考坐标系, 参考坐标系  $\{0\}$  的  $Z_0$  轴与关节 1 共线, 末端连杆坐标系  $\{6\}$  的圆心建立在右吸盘足的圆心. 连杆坐标系中

的连杆 D-H 坐标参数分别为  $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\theta_3$ 、 $\theta_4$  和  $d_5$ .

其中旋转关节  $J_3$  是一个被动关节, 其与旋转关节  $J_2$  及齿轮副构成行星轮系. 根据行星轮系原理, 当机器人左吸盘足吸附时, 半圆柱体 1 相当于太阳轮, 半圆柱体 2 相当于行星轮. 由本坐标系的定义, 系杆的角速度为坐标系  $\{2\}$  中旋转关节  $J_2$  的角速度  $\dot{\theta}_2$ , 半圆柱体 2 相对于  $o_2$  点的角速度为坐标系  $\{3\}$  中旋转关节  $J_3$  的角速度  $\dot{\theta}_3$ . 由于两个半圆柱体的半径相等, 由刚体绕两个平行轴转动合成原理可知  $\dot{\theta}_2 = \dot{\theta}_3$ . 又因本坐标系中旋转关节  $J_2$  和  $J_3$  的初值均为 0, 所以关节变量  $\theta_2$  与  $\theta_3$  相等, 即  $\theta_2$  与  $\theta_3$  存在 1:1 的耦合关系.

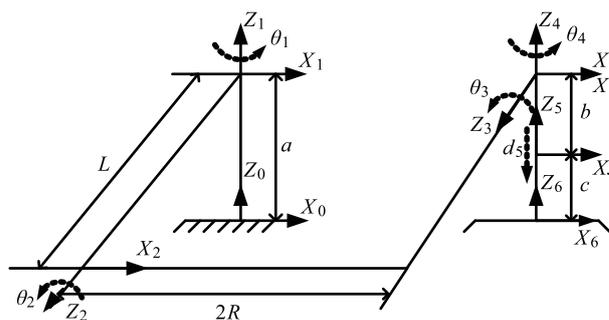


图 3 D-H 坐标和关节变量参数

Fig.3 D-H coordinates and link variable parameters

表 1 关节变量参数表

Tab.1 joint variable parameters

$i$	$a_{i-1}$	$\alpha_{i-1}$	$d_i$	$\theta_i$	关节变量	变化范围
1	0	0	$a$	$\theta_1$	$\theta_1$	$-\pi \sim \pi$
2	0	$\pi/2$	$L$	$\theta_2$	$\theta_2$	$-\frac{\pi}{9} \sim \frac{10}{9}\pi$
3	$2R$	0	$-L$	$\theta_3$	$\theta_3$	$-\frac{\pi}{9} \sim \frac{10}{9}\pi$
4	0	$\pi/2$	0	$\theta_4$	$\theta_4$	$-\pi \sim \pi$
5	0	0	$-b-d_5$	0	$d_5$	$-5 \sim 10$
6	0	0	$-e$	0	0	

#### 3.2 运动学方程

机器人运动学方程的变换矩阵为

$$T = {}^0_1T_2T_3T_4T_5T_6T = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

其中

$$\begin{aligned} n_x &= (c_1c_2c_3 - c_1s_2s_3)c_4 - s_1s_4 \\ n_y &= (s_1c_2c_3 - s_1s_2s_3)c_4 + c_1s_4 \\ n_z &= (s_2c_3 + c_2s_3)c_4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 o_x &= -(c_1c_2c_3 - c_1s_2s_3)s_4 - s_1c_4 \\
 o_y &= -(s_1c_2c_3 - s_1s_2s_3)s_4 + c_1c_4 \\
 o_z &= -(s_2c_3 + c_2s_3)s_4 \\
 a_x &= -c_1c_2s_3 - c_1s_2c_3 \\
 a_y &= -s_1c_2s_3 - s_1s_2c_3 \\
 a_z &= -s_2s_3 + c_2c_3 \\
 p_x &= -(-c_1c_2s_3 - c_1s_2c_3)c + (-c_1c_2s_3 \\
 &\quad - c_1s_2c_3)(-b - d_5) + 2c_1c_2R \\
 p_y &= -(-s_1c_2s_3 - s_1s_2c_3)c + (-s_1c_2s_3 \\
 &\quad - s_1s_2c_3)(-b - d_5) + 2s_1c_2R \\
 p_z &= -(-s_2s_3 + c_2c_3)c + (-s_2s_3 \\
 &\quad + c_2c_3)(-b - d_5) + 2Rs_2 + a
 \end{aligned}$$

$c_i$  和  $s_i$  分别表示  $\cos\theta_i$  和  $\sin\theta_i$  ( $i = 1 \sim 4$ ) .

### 3.3 运动学反解

左吸盘足吸附支撑的模式中, 根据变换矩阵  $T$  可求得机器人各个关节变量的值. 由  ${}^0T^{-10}T = {}^1_6T$  得

$$\begin{aligned}
 \theta_1 &= \arctan \frac{p_y}{p_x} & \theta_2 &= \frac{1}{2} \arccos a_z \\
 \theta_3 &= \frac{1}{2} \arccos a_z & \theta_4 &= \arcsin(-s_1n_x + c_1n_y)
 \end{aligned}$$

又由  ${}^3_4T^{-12}T^{-11}T^{-10}T^{-10}T = {}^4_6T$  得

$$\begin{aligned}
 d_5 &= -(b + c + (-s_3c_3 - c_3s_2)c_1p_x \\
 &\quad + (-s_3c_2 - c_3s_2)s_1p_y + (-s_3s_2 + c_3c_2)p_z \\
 &\quad - (-s_3s_2 + c_3c_2)a + 2Rs_3)
 \end{aligned}$$

## 4 行走模式 (Locomotion modes)

轮足复合式爬壁机器人有直线运动、平面旋转和交叉壁面跨越三种基本运动模式, 下面分别对三种基本运动模式进行详细分析说明.

### 4.1 直线运动

机器人通过两个半圆柱体的相对滚动和两个真空吸盘足的交替吸附与释放实现沿壁面直线行走, 以吸盘足 1 吸附平面作为机器人的初始状态为例分析, 吸盘足 2 吸附壁面的情况可以类推.

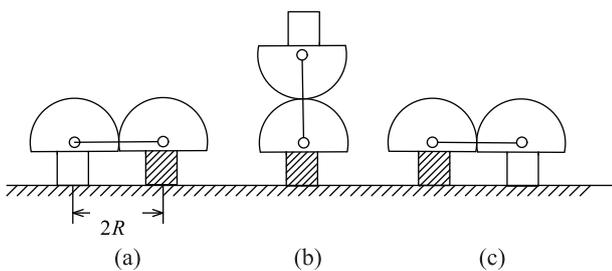


图 4 直线运动步序图

Fig.4 Locomotion sequence to moving straight

机器人的平面直线运动过程如图 4 所示 (其中阴影部分表示吸盘足 1):

- 1) 吸附吸盘足 1, 释放吸盘足 2 (图 4a);
- 2) 电机 2 驱动旋转关节  $J_2$ , 半圆柱体 2 相对半圆柱体 1 滚动 (图 4b);
- 3) 吸附吸盘足 2, 释放吸盘足 1 (图 4c) .

依据行星轮系原理, 机器人的单步步距为两个半圆柱体中心之间的距离, 即半圆柱体半径的两倍.

### 4.2 平面旋转

机器人两个半圆柱体内各有一个垂直旋转关节, 在单吸盘吸附状态下, 通过电机 1 或者电机 3 驱动旋转关节  $J_1$  或  $J_4$  实现机器人的平面旋转运动, 本文以吸盘足 1 吸附平面为例加以分析说明, 吸盘足 2 吸附情况可以类推.

机器人的平面旋转运动如图 5 所示 (其中阴影部分代表吸盘足 1):

- 1) 吸附吸盘足 1, 释放吸盘足 2 (图 5a);
- 2) 电机 1 驱动旋转关节  $J_1$ , 机器人原地转动角度为  $\gamma$  (图 5b);
- 3) 吸附吸盘足 2, 释放吸盘足 1 (图 5c) .

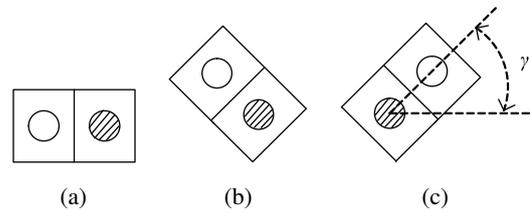


图 5 平面旋转步序图

Fig.5 Locomotion sequence of turning in plane

### 4.3 交叉壁面跨越

机器人通过旋转关节  $J_2$  和移动关节  $J_5$  的反复动作不断调节吸盘足的位置与姿态, 实现交叉壁面的跨越. 以吸盘足 1 吸附平面 1 跨越  $\alpha$  度外角交叉壁面的情况为例加以说明, 其他情况可以类推, 如图 6 所示 (阴影部分代表吸盘足 1):

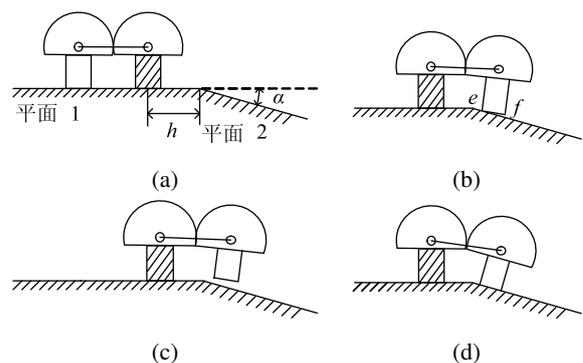


图 6 交叉壁面跨越步序图

Fig.6 Locomotion sequence to transmitting cross-wall

1) 机器人运动至距交叉壁面  $h$  的位置, 吸盘足 1 吸附于平面 1, 释放吸盘足 2 (图 6a);

2) 电机 2 驱动旋转关节  $J_2$ , 两个半圆柱体相对滚动, 直至吸盘足 2 的边缘点  $e$  或点  $f$  与平面 2 接触 (图 6b);

3) 电机 4 驱动移动关节  $J_5$  收缩或伸长吸盘足 2 (图 6c);

4) 重复步骤 2) 和步骤 3), 调节吸盘足 2 的位置与姿态, 直至吸盘足 2 吸附平面 2 (图 6d) .

机器人跨越交叉壁面之前, 吸盘足 1 中心距交叉壁面的距离  $h$  应在合适的范围内. 如果机器人距交叉面的距离过近, 则可能由于吸盘足 1 不能完全落在平面 1 上而导致吸盘足 1 漏气, 不能安全吸附; 反之, 如果机器人距离交叉面的距离过远, 那么可能由于吸盘足 2 不能完全落在平面 2 上, 导致吸盘足 2 漏气不能安全吸附. 因此下面具体分析机器人交叉壁面跨越过程中距交叉面的距离  $h$  的合适范围.

### 5 交叉壁面跨越的位置参数分析 (Cross-wall analysis of location parameter)

以与半圆柱体 1 相连的吸盘足 1 吸附壁面为例, 根据行星轮系原理, 当系杆绕  $O_1$  点转动时, 相当于行星轮的半圆柱体 2 绕  $O_2$  点转动的角速度为系杆角速度的 2 倍, 即当系杆绕  $O_1$  点由  $0^\circ$  转动至  $200^\circ$  时, 半圆柱体 2 绕  $O_2$  点由  $0^\circ$  转至  $400^\circ$ , 那么吸盘足 2 就具有与任意内角交叉面平行的姿态以及与  $0 \sim 40^\circ$  外角交叉面平行的姿态. 因此在机器人距交叉面的距离参数  $h$  合适的条件下, 机器人利用关节  $J_2$  和  $J_5$  的调节可实现任意内角和一定外角交叉面的跨越. 本文以外角交叉面的跨越为例分析机器人距交叉面距离  $h$  的参数范围.

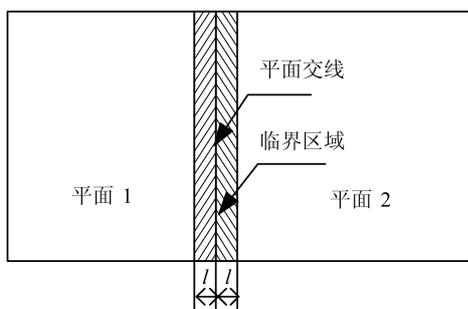


图 7 临界区域示意图  
Fig.7 Sketch of critical region

图 7 所示, 定义距离交叉面交线的距离小于  $l$  的阴影区域范围为临界区域, 即吸盘足吸附的非安全区域. 如图 8 所示, 定义处于支撑状态的吸盘足

中心距离交叉面的最远距离为机器人跨越交叉面的最大距离 ( $L_{max}$ ), 无需关节调节机器人就可以直接吸附工作壁面的距离为理想距离 ( $L$ ), 定义处于支撑位置的吸盘足中心距离交叉面的最近距离为机器人跨越交叉面的最小距离 ( $L_{min}$ ).

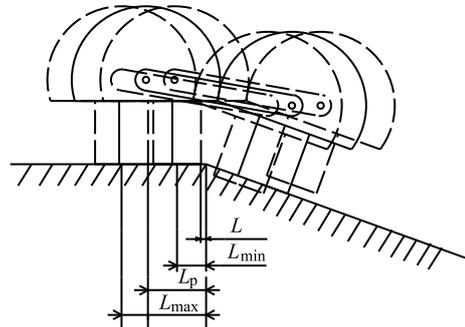


图 8 距交叉面示意图  
Fig.8 Sketch of location to cross-wall

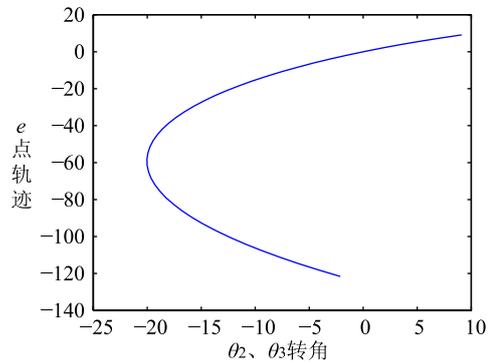


图 9 吸盘足  $e$  点轨迹  
Fig.9  $e$  point track of suction foot

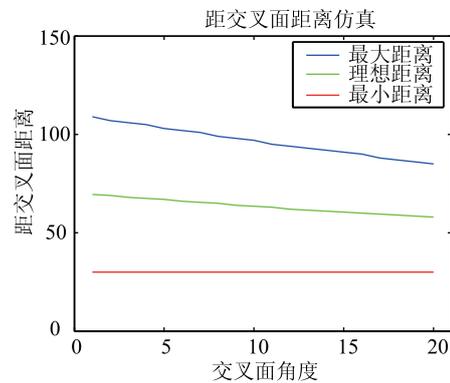


图 10 参数  $h$  的仿真结果  
Fig.10 Simulation of parameter  $h$

以机器人本体半径  $R$  为 70 mm, 高  $H$  为 150 mm, 吸盘半径  $r$  为 50 mm 为模型参数, 设定临界区域的距离  $l$  为 5 mm. 根据机器人的运动学方程, 当  $\theta_2$  由  $0^\circ$  转动至  $-45^\circ$  时, 吸盘足 2 左侧边缘点  $e$  的运动轨迹近似抛物线形状, 如图 9 所示. 随着交叉面角度的增大,  $e$  点距离交叉面交线的距离也变大,

所以机器人距离交叉面的最大距离  $L_{\max}$  随着交叉面角度的增加而减小。同理, 机器人距离交叉面的理想距离  $L$  也随着交叉面角度的增加而减小, 而最小距离  $L_{\min}$  为恒值, 即为吸盘足半径  $r$  与临界区域距离  $l$  的和值, 为 30 mm。仿真结果如图 10。机器人对于不同外角交叉面的跨越有不同的最大距离和理想距离, 二者随着外角角度的增加而递减, 因此为保证机器人的安全吸附, 机器人跨越交叉壁面的距离  $h$  应在最小的最大距离与最小距离之间。

## 6 仿真分析 (Simulation analysis)

以两足尺蠖式爬壁机器人 Crawler 为代表, 比较本文提出的新型轮足复合式爬壁机器人与 Crawler 的运动速度及跨越交叉面的角度范围。图 11 所示为两种机器人的运动仿真。

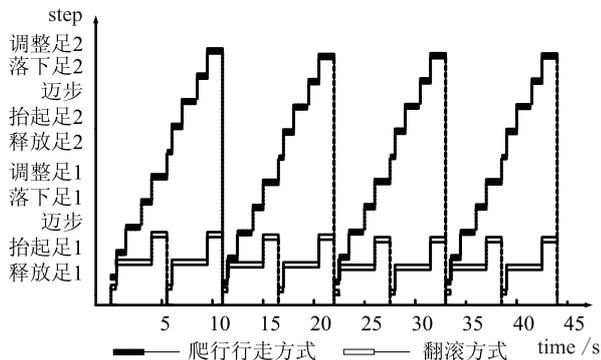


图 11 两种步序仿真分析示意图

Fig.11 Simulation analyse of two kinds of locomotion sequence

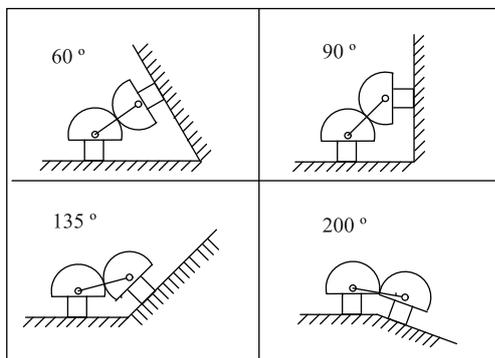


图 12 机器人跨越交叉面示意图

Fig.12 Sketch of robot traversing cross-wall

由图可以看到, 采用爬行方式运动的 Crawler 需要在 12 s 内做 10 个动作才能完成一步直线行走运动, 而采用翻滚方式的轮足复合式爬壁机器人仅需要 3 个动作就可以完成单步的直线行走运动, 而且所需时间仅是前者的一半。因此, 新型爬壁机器人的单步行走需要的动作简单, 节省了运动时间, 提高了机器人的运动速度。

Crawler 机器人由于机构构型的约束, 可跨越交叉面的角度范围为  $90 \sim 210^\circ$ [7], 轮足复合式爬壁机器人是基于行星轮系原理设计的, 在运动过程中可以调节机器人姿态, 机器人可以跨越任意的内角交叉面和  $0 \sim 40^\circ$  之间的外角交叉面, 如图 12 所示。

## 7 结论 (Conclusion)

本文基于行星轮系运动及双足真空吸附原理提出了一种新型轮足复合式爬壁机器人机构, 机器人利用两个旋转关节和两个外啮合齿轮副的半圆柱体构成行星轮系, 将运动与调姿复合。该机构有效地结合了轮式机构移动速度快和腿足式机构越障能力强的优点, 能够实现直线行走、平面旋转和跨越交叉壁面等运动模式, 仿真结果表明该机构具有移动速度快、运动灵活、跨越交叉壁面能力强等特点。

## 参考文献 (References)

- [1] 肖立, 佟仕忠, 丁启敏, 等. 爬壁机器人的现状与发展 [J]. 自动化博览, 2005, 22(1): 81~82,84.  
Xiao Li, Tong Shi-zhong, Ding Qi-min, *et al.* The current situation and development of the wall-climbing robot[J]. Automation Panorama, 2005, 22(1): 81~82,84.
- [2] Longo D, Muscato G. The Alicia<sup>3</sup> climbing robot: A three-module robot for automatic wall inspection[J]. IEEE Robotics and Automation Magazine, 2006, 13(1): 42~50.
- [3] 刘淑霞, 王炎, 徐殿国, 等. 爬壁机器人技术的应用 [J]. 机器人, 1999, 21(2): 148~155.  
Liu Shu-xia, Wang yan, Xu Dian-Guo, *et al.* The application of wall-climbing robot[J]. Robot, 1999, 21(2): 148~155.
- [4] Ryu S W, Park J J, Ryew S M, *et al.* Self-contained wall-climbing robot with closed link mechanism[A]. Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems[C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2001. 839~844.
- [5] Luk B L, Collie A A, Billingsley J. Robug II: An intelligent wall climbing robot[A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation[C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1991. 2442~2347.
- [6] Xiao J Z, Minor M, Dulimarta H, *et al.* Modeling and control of an under-actuated miniature crawler robot[A]. Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems[C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2001. 1546~1551.
- [7] 张培峰. 微小型爬壁机器人机构与控制方法的研究 [D]. 沈阳: 中科院沈阳自动化研究所, 2006.  
Zhang Pei-feng. Research on Mechanism and Control Methods of a Miniature Climbing Robot[D]. Shenyang: Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, 2006.

## 作者简介:

刘爱华 (1977-), 女, 硕士. 研究领域: 机器人机构与控制。

王洪光 (1965-), 男, 研究员, 博士导师. 研究领域: 机器人机构学, 特种机器人及机电一体化技术。