

# 主动自适应悬架机器人概念样机及其配置模型和方法\*

尚建忠<sup>1,2</sup>, 张新访<sup>1</sup>, 罗自荣<sup>2</sup>, 宋春霞<sup>2</sup>

(1. 华中科技大学 机械科学与工程学院, 湖北 武汉 430074 ;

2. 国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 未来的空间探测要求机器人系统具备高可靠性、高移动性,以胜任未知非结构的地理环境。结合自适应悬架机器人和主动悬架机器人的优点,创新提出主动自适应悬架机器人的概念。它是一类具有主动配置功能的自适应悬架机器人,在一般复杂地形环境下,利用移动机构的超静定特性自适应地形,在极端复杂环境下,主动调整悬架结构等移动机构的运动配置适应地形变化,获取最佳移动性能。设计了一种六轮主动自适应悬架样机,可实现折叠、翻到后起身,建立了机器人移动性能综合评价模型,并给出了相应的配置模型和主动配置方法,通过主动配置可明显提高主动自适应悬架机器人的移动性能。

**关键词** 空间控制 ; 机器人 ; 主动配置 ; 自适应 ; 悬架

**中图分类号** TP24 **文献标识码** A

## A Conceptual Rover with Active Self-adaptive Suspension and Its Configuration Model & Means

SHANG Jian-zhong<sup>1,2</sup>, ZHANG Xin-fang<sup>1</sup>, LUO Zi-rong<sup>2</sup>, SONG Chun-xia<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical Science and Engineering, Huazhong Univ. of Science and Technology, Wuhan 430074, China ;

2. College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract** The space rover shoulder is expected to have higher mobility and reliability to satisfy future space exploration mission in unknown irregular environment. Through the combination of the advantages of both the self-adaptive and active rovers, the concept of active self-adaptive suspension rover, a type of self-adaptive suspension rovers, which can reconfigure themselves according to terrain, is creatively proposed. In even terrain, the active self-adaptive suspension rover just works like self-adaptive suspension rovers, while in rough terrain, it can reconfigure its structure to fit terrain and promote mobility. To verify the idea, a six wheeled active self-adaptive suspension based concept rover, which can fold and stand up if it is upset, was constructed. Based on an integrated model of mobility for space rover, the configuration model and the active way to reconfigure were also proposed. It is revealed from the study that the active configuration makes the active self-adaptive suspension rover own better mobility and reliability, which enable the active self-adaptive suspension rover to fit unknown irregular environment better.

**Key words** space rover ; robot ; active reconfiguration ; self adaptive ; suspension

未来的空间探测任务要求机器人能在预先未知或非结构化的环境中执行变化任务,轮式移动机器人具有结构简单、质量轻、高速高效、实用等优点,国内外空间探测机器人的研究以轮式机器人为主。

轮式移动机器人可分为自适应悬架机器人和主动悬架机器人。自适应悬架机器人,如美国喷气推进实验室(JPL)研制的 Rocky 系列机器人<sup>[1-3]</sup>和 RATLER<sup>[4]</sup>、日本宇宙开发事业团(NASDA)研制的 Micro-5<sup>[5]</sup>、哈尔滨工业大学研制的行星轮月球车、上海交通大学研制的五轮月球车,主要利用移动机构的超静定特性实现轮系对地面的自适应,达到平顺车体、均衡牵引力目的。其机械结构和控制系统简单、可靠,但只能适应一般复杂地形环境。主动悬架机器人,如美国 JPL 研制的 4 轮主动悬架机器人 gofor、Nanorover 和 SRR、美国卡内基—梅隆大学(CMU)机器人研究所野外机器人中心研制的流浪者

\* 收稿日期 2005 - 12 - 12

基金项目 国家自然科学基金重点项目(602346030)

作者简介 尚建忠(1967—),男,教授,在职博士生。

“Nomad”<sup>[6]</sup>通过机载传感器在线检测机器人运动姿态,采用机电控制主动调整移动机构的运动配置,获取最佳移动性能。根据麻省理工大学 FSRL 实验室对 SRR 的研究结果,其能耗降低 38%,抗倾覆性能、行驶平顺性等移动性能指标得到极大提高。主动悬架机器人的不足是控制系统复杂,可靠性降低,限制了它的实际应用。

### 1 主动自适应悬架机器人的概念

结合自适应悬架系统和主动悬架系统的优点,提出主动自适应悬架机器人。如图 1 所示,它是一类具有“主动配置”功能和“自适应”特征的机器人,与自适应悬架机器人和主动悬架机器人的地形适应机理不同,在一般复杂地形环境下,其移动机构能自适应地调整悬架、轮系等移动机构的运动配置适应于地形,即工作在“自适应”状态;在极端复杂环境下,又能主动地调整悬架和轮系的运动配置以调整机器人质心分布,适应各种复杂地形环境并获取最佳移动性能,即工作在“主动配置”状态。

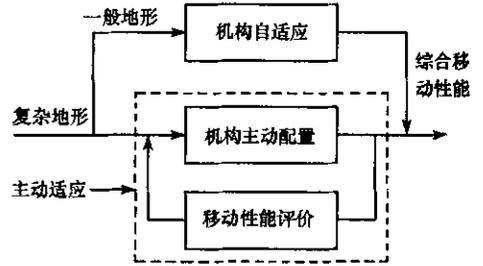


图 1 主动自适应悬架对地形适应机理  
Fig.1 The pinciple of active self-adaptive suspension adaption to terrian

主动自适应悬架机器人具有“主动配置”和“自适应”这种并联式的“冗余设计”,克服了主动悬架机器人控制复杂、可靠性降低的不足,确保其具有良好的牵引特性、行驶平顺性和抗倾覆特性,综合移动性能得到提高,并可大幅度提高可靠性。

### 2 六轮主动自适应悬架机器人样机

设计一种主动自适应悬架机器人,如图 2 所示,整车结构由车架、轮系、车体三部分组成。杆  $L_1$  和杆  $L_2$  夹角  $\delta$  确定,两者作为一个整体构成副摇臂,可相对于杆  $L_3$  自由转动。但  $\delta$  能通过机电控制系统进行主动调整,称为主动角。车架的杆  $L_3$  为主摇臂,可与车体之间相对转动,两者之间的转动角  $\phi_1$  可随地形自适应变动,杆  $L_3$  与杆  $L_2$  之间的夹角  $\phi_2$  也能自适应调整,均为自适应角。

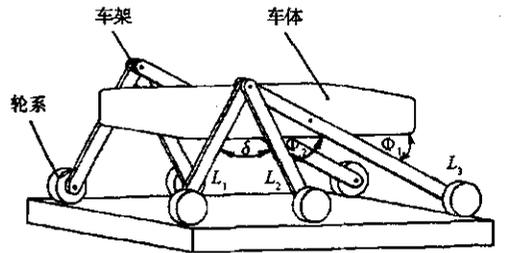


图 2 原理样机  
Fig.2 Concept prototype

在一般复杂地形环境下,主动角  $\delta$  不变,机器人自适应地调整自适应角  $\phi_1$  和  $\phi_2$  适应于地形,如图 3 所示,与自适应悬架机器人工作原理相同。在极端复杂环境下,又能主动地调整主动角  $\delta$  实现重心的重新配置以应对更为严峻的地形环境,比如在倾斜地形环境下,主动自适应悬架机器人通过增大主动角  $\delta'$  使在高处一侧的车架降低,减小主动角  $\delta$  使在低处一侧的车架升高,增强了车体平顺性和抗倾覆性,如图 4 所示。

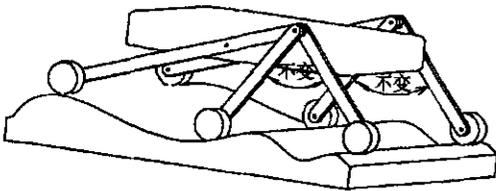


图 3 一般地形环境下  
Fig.3 Even terrain

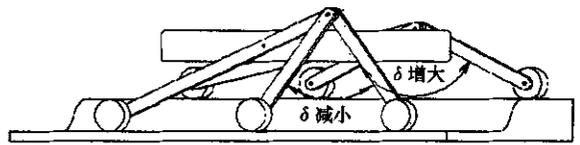


图 4 倾斜地形  
Fig.4 Incline terrain

主动自适应悬架机器人通过调整主动角  $\delta'$  和  $\delta$ , 还可实现折叠,如图 5 所示。对普通移动机器人而言,机器人翻倒是致命的,主动自适应悬架机器人能较好地应对这种情况,由于某种原因机器人翻倒后,主动自适应悬架机器人增大其主动角  $\delta$  和  $\delta'$ ,直至起身,如图 6 所示。

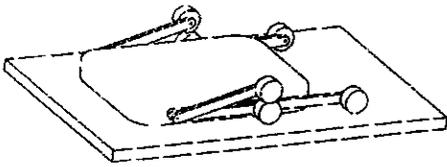


图5 折叠  
Fig.5 Fold

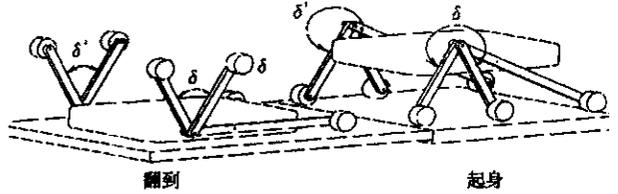


图6 倾覆之后起身  
Fig.6 Stand up after over upset

### 3 基于移动性能评价的主动配置模型

评价主动自适应悬架机器人移动性能的指标参数有:越障性能( $O$ )、抗倾覆性能( $S$ )、行驶平顺性( $M$ )、几何通过性( $G$ )、牵引控制特性( $T$ )和能耗特性( $P$ )等。因此,对某一具体的探测任务,主动自适应悬架机器人移动性能综合评价参数  $M$  可表示为

$$M = K_o \cdot O + K_s \cdot S + K_m \cdot M + K_g \cdot G + K_t \cdot T + K_p \cdot P \quad (1)$$

其中,  $K_o$ 、 $K_s$ 、 $K_m$ 、 $K_g$ 、 $K_t$ 、 $K_p$  分别为越障性能( $O$ )、抗倾覆性能( $S$ )、行驶平顺性( $M$ )、几何通过性( $G$ )、牵引控制特性( $T$ )和能耗特性( $P$ )的权重。

机器人在未知不确定环境中运动时,面临各种风险,倾覆将直接造成机器人损坏,最终使探测任务失败,在设计时必须避免此情况的发生。对图2所示的原理样机抽象得到的配置模型如图7,取车体质心为局部坐标系原点  $O$ ,记重力方向为  $OG$ ,记轮胎与地面的接触点为  $P_i (i = 1, \dots, 6)$ ,则  $P_i P_{i+1} (i < 6)$  和  $P_6 P_1$  即为车体的翻转轴。显然,重力对该轴施加的抗翻转矩越大,则越难沿该轴翻转。

因此,整车抗翻稳定性可表示为

$$S = \min(t_1, \dots, t_6) \quad (2)$$

其中,  $t_i$  表示重力  $OG$  对翻转轴  $i$  的转矩,不失一般性,取  $OG$  为单位力,则  $t_i$  的大小可表示为重力  $OG$  和翻转轴  $i$  的最短距离  $d$  和夹角正弦  $\sin\Phi$  的乘积。记

$$p_i = (x_1, y_1, z_1), \quad p_{i+1} = (x_2, y_2, z_2), \quad O = (x_3, y_3, z_3), \quad G = (x_3, 0, z_3)$$

又由

$$\sin\Phi = \frac{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}}, \quad d = \frac{|(z_2 - z_1)(y_1 - y_3) + (x_1 - x_2)(z_1 - z_3)|}{\sqrt{(z_1 - z_2)^2 + (x_1 - x_2)^2}}$$

则得

$$t_i = \frac{|(z_2 - z_1)(y_1 - y_3) + (x_1 - x_2)(z_1 - z_3)|}{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}} \quad (3)$$

显然,对初始稳定的主动自适应悬架机器人,  $S = 0$  为出现倾翻现象的临界值。

对图7所示主动自适应悬架机器人,各车轮在车体坐标系  $oxyz$  的坐标:

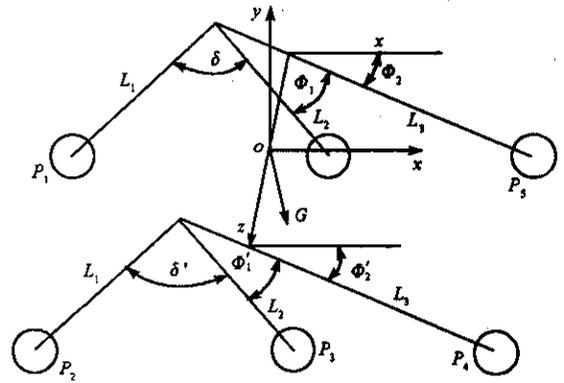


图7 配置模型  
Fig.7 Configuration model

$$\begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \\ p_5 \\ p_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \\ x_4 & y_4 & z_4 \\ x_5 & y_5 & z_5 \\ x_6 & y_6 & z_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (u-1)l_3 \cos \Phi_2 + l_1 \cos(\Phi_1 + \Phi_2 + \delta) & (1-u)l_3 \cos \Phi_2 - l_1 \sin(\Phi_1 + \Phi_2 + \delta) & -l \\ (u-1)l_3 \cos \Phi'_2 + l_1 \cos(\Phi'_1 + \Phi'_2 + \delta') & (1-u)l_3 \sin \Phi'_2 - l_1 \sin(\Phi'_1 + \Phi'_2 + \delta') & l \\ (u-1)l_3 \cos \Phi'_2 + l_2 \cos(\Phi'_1 + \Phi'_2) & (1-u)l_3 \sin \Phi'_2 - l_2 \sin(\Phi'_1 + \Phi'_2) & l \\ ul_3 \cos \Phi'_2 & -ul_3 \sin \Phi'_2 & l \\ ul_3 \cos \Phi_2 & -ul_3 \sin \Phi_2 & -l \\ (u-1)l_3 \cos \Phi_2 + l_2 \cos(\Phi_1 + \Phi_2) & (1-u)l_3 \sin \Phi_2 - l_2 \cos(\Phi_1 + \Phi_2) & -l \end{bmatrix}$$

进一步可得

$$\begin{bmatrix} p_1 p_2 \\ p_2 p_3 \\ p_3 p_4 \\ p_4 p_5 \\ p_5 p_6 \\ p_6 p_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (u-1)l_3(\cos \Phi_2 - \cos \Phi'_2) + l_1(\cos(\Phi_1 + \Phi_2 + \delta) - \cos(\Phi'_1 + \Phi'_2 + \delta')) - (1-u)l_3(\sin \Phi_2 - \sin \Phi'_2) - l_1(\sin(\Phi_1 + \Phi_2 + \delta) - \sin(\Phi'_1 + \Phi'_2 + \delta')) & -2l \\ l_1 \cos(\Phi'_1 + \Phi'_2 + \delta') - l_2 \cos(\Phi'_1 + \Phi'_2) & l_2 \sin(\Phi'_1 + \Phi'_2) - l_1 \sin(\Phi'_1 + \Phi'_2 + \delta') & 0 \\ -l_3 \cos \Phi'_2 + l_2 \cos(\Phi'_1 + \Phi'_2) & l_3 \sin \Phi'_2 - l_2 \sin(\Phi'_1 + \Phi'_2) & 0 \\ ul_3(\cos \Phi'_2 - \cos \Phi_2) & ul_3(\sin \Phi_2 - \sin \Phi'_2) & 2l \\ l_3 \cos \Phi_2 - l_2 \cos(\Phi_1 + \Phi_2) & l_2 \sin(\Phi_1 + \Phi_2) - l_3 \sin \Phi_2 & 0 \\ l_2 \cos(\Phi_1 + \Phi_2) - l_1 \cos(\Phi_1 + \Phi_2 + \delta) & l_1 \sin(\Phi_1 + \Phi_2 + \delta) - l_2 \sin(\Phi_1 + \Phi_2) & 0 \end{bmatrix} \tag{4}$$

再由车体在世界坐标系(地球为参照系)质心位置  $o_w(x_w, y_w, z_w)$  的滚动角  $\alpha$  和俯仰角  $\beta$ , 可得车体坐标系  $o-xyz$  到世界坐标系  $w-xyz$  的变换矩阵

$$T = Trans(x_w, y_w, z_w) Rot(x, -\beta) Rot(z, -\alpha) = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 & x_w \\ -\sin \alpha \cos \beta & \cos \alpha \cos \beta & \sin \beta & y_w \\ \sin \alpha \sin \beta & -\sin \beta \cos \alpha & \cos \beta & z_w \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

则其逆变换

$$T^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \cos \beta & \sin \alpha \sin \beta & x_o \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \cos \beta & -\sin \beta \cos \alpha & y_o \\ 0 & \sin \beta & \cos \beta & z_o \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

其中

$$\begin{aligned} x_o &= -\cos \alpha x_w + \sin \alpha \cos \beta y_w - \sin \alpha \sin \beta z_w \\ y_o &= -\sin \alpha x_w - \cos \alpha \cos \beta y_w + \cos \alpha \sin \beta z_w \\ z_o &= -\sin \beta y_w - \cos \beta z_w \end{aligned}$$

因此,重力在车体坐标系的表示为

$$OG = T^{-1}(x_w, y_w, z_w, 1)^T \tag{5}$$

由式(4)(3)可得  $OG$  对各翻转轴的转矩,再由(2)式进一步可得整车抗翻稳定性  $S$ 。

#### 4 主动配置方法

对图2所示的主动自适应悬架机器人原理样机,可建立如图7所示的配置模型。其当前配置记为  $(\alpha, \delta, \Phi_1, \Phi_2, \delta', \Phi'_1, \Phi'_2, \alpha, \beta)$ , 其中  $(\delta, \delta')$ 、 $(\Phi_1, \Phi'_1)$ 、 $(\Phi_2, \Phi'_2)$  分别表示车架的主动角、自适应角;  $\alpha$ 、 $\beta$  分别表示车体的滚动角和俯仰角。

由于移动性能对空间探测任务的成败有至关重要的影响,本文主要依据(1)式调整机器人的运动配置。主动自适应悬架机器人的主动配置过程分三步进行:

(1)通过车载传感器在线检测机器人得到运动参数  $(\delta, \Phi_1, \Phi_2, \delta', \Phi'_1, \Phi'_2, \alpha, \beta)$ , 根据式(1)评估当前运动配置  $C$  (2)逆运动学求解, 根据式(1)得到优化的运动学配置  $C'$  (3)将机器人运动学配置由当前配置  $C$  调整为优化配置  $C'$ 。

对聚氨酯盘定点抛光 10min 后的效果图。实验表明,这种纹理是由加工初期聚氨酯的表面较为粗糙引起的。随着聚氨酯盘的磨损,这种纹理的明显程度减弱。

在对沥青材料的大量实验中,发现沥青对表面的纹理有很强的弱化作用。其加工所得的表面光滑,无明显纹理。这可能与沥青材料的流动性、热塑性好有关。

### 3 结论

(1) 聚氨酯材料具有较高的去除效率,其去除函数接近理想的高斯分布函数,具有良好的稳定性,但其与面形的吻合程度差,加工后表面有纹理。因此,聚氨酯材料适用于粗抛光阶段。

(2) 阻尼布材料具有良好的稳定性,但其去除率低且加工后表面有纹理。因此,阻尼布材料适用于精抛光阶段。

(3) 沥青材料具有较高的去除效率,加工后表面质量好,但稳定性差。因此,沥青材料适用于最后的修形加工。

### 参考文献:

- [1] 王权陡. 计算机控制离轴非球面制造技术研究[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2001.
- [2] 王贵林. SiC 光学材料超精密研抛关键技术研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2002.
- [3] Li S Y, Wang G L, Dai Y F, et al. The Determination for Polishing Tool's Dimension in Aspheric Optics Machining[A]. ICPN '2002[C]. National University of Defense Technology Press, 2002 (in Chinese).
- [4] 杨力. 先进光学制造技术[M]. 北京:科学出版社, 2001: 48-50.
- [5] 李爱民. 计算机控制小工具研抛的去除特性及工艺研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2003.

(上接第 96 页)

### 5 结论

针对国家探月需求,提出了主动自适应悬架机器人的概念,设计了一种概念样机,对其主动配置理论与方法进行了初步研究,主动自适应悬架机器人结合了自适应悬架系统和主动悬架系统二者的优点,克服了主动悬架机器人控制复杂、可靠性降低的不足,具有良好的牵引特性、行驶平顺性和抗倾覆特性,其综合移动性能得到提高。

### 参考文献:

- [1] Matijevic J, Shirley D. The Mission and Operation of the Mars Path Finder Micro Rover[A]. IFAC 13th Triennial World Congress[C], 1996: 1-6.
- [2] Hayati S, Volpe R, Backes P, et al. The Rocky 7 Rover: A Mars Science Craft Prototype[A]. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation[C], 1997: 2485-2464.
- [3] Volpe R, Balamam J, Ohm T, et al. Rocky 7: A Next Generation Mars Rover Prototype[J]. Advanced Robotics, 1997, 11(4): 341-358.
- [4] Koshiyama A, Yamafuji K. Design and Control of an All-direction Steering Type Mobile Robo[J]. The International Journal of Robotics Research, 1993, 12(5): 411-419.
- [5] Yoji K, Koji K, Kazuaki N, et al. Low Power Mobility System for Micro Planetary Rover 'Micro5' [A]. In: Michael Perryed. ISAIRAS '99: Fifth International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics, and Automation in Space[C], ESTEC, Noordwijk, the Netherlands, 1999.
- [6] Rollins E, Luntz J, Foessel A, et al. Nomad: A Demonstration of the Trans Forming Chassis[A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation[C], 1998: 611-617.

