基于 VCM 的自适应越障机器人优化设计

刘锦华 毕树生 孙明磊 裴 旭

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

摘 要: 虚拟运动中心(VCM, Virtual Center of Motion)机构实质上是一种少自由度的功能机构,根据 VCM 机构的特点,将其应用到被动式自适应越障机器人的设计中,提高了机器人越障性能. 通过分析 VCM 位置与前导轮轮心的位置关系,优化了前导机构的结构参数. 利用 VCM 的特点简化了前导机构的静力学模型,通过量化的对比分析了悬挂在前导机构的弹簧在改善机器人整体力学性能中的作用,并优化了弹簧的安装位置. 试验中优化后样机可以平稳的翻越约 2.1 倍轮子直径高的竖直台阶障碍,并且可以连续攀登单阶 1.27 倍轮子直径高楼梯和自适应各种复杂地面.

关 键 词: 移动机器人; 移动; 被动式; 静力学分析

中图分类号: TH 112

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2009)02-0261-05

Optimal design for passive robot in rough terrain based on VCM

Liu Jinhua Bi Shusheng Sun Minglei Pei Xu

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The mechanism with the characteristics of virtual center of motion (VCM) is one of the limited degree of freedom (DOF) mechanisms substantively. The VCM was employed in robots which were mobile on rough terrain for its special characteristics. The front mechanism was optimized through analyzing the relation of the VCM and the center of the front wheel. The static model of the robot was simplified for the character of VCM. According to the static analysis, the parameter and the position of the spring suspension on the front mechanism were optimized through minimizing the friction coefficient of the wheels. The ground contact of all wheels at any time was guaranteed by the spring. An optimized prototype was designed and manufactured. It is able to passively overcome obstacles of up to 2.1 times of its wheel diameter and can climb stairs with steps of over 1.27 times. The advance of the passive adaptation in rough terrain was shown in the contrastive experiments.

Key words: mobile robot; locomotion; passive; static analysis

移动机器人主要通过 2 种形式来适应复杂地形,一种是主动式的,即通过传感器探测地形,根据探测信息由额外的驱动器主动调整移动机构以适应地形,如美国 JPL 实验室的 SRR 机器人通过改变驱动轮的位置来调整重心以适应地形[1-4]. 另一种是被动式的,地形的变化将促使机器人移动机构发生被动的变形,通过变形来适应地形. 美国 Sojourner 机器人的 rocker-bogie 结构就是典型的通过被动变形来适应地形的移动机构[5]. 被动式移动机构比主动式移动机构需要更少的传感器和驱动器,可以节省成本,而且不需要结构本身的主动变形去适应复杂的地面环境,可以节省有限的资源来完成更加重要和紧急的任务. 本文根据四边形机构存在瞬时虚拟运动中心(VCM, Virtual Center of Motion)的特点,将其应用到复杂地形移动机器人的结构设计中.

收稿日期: 2008-07-20

基金项目: 新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-06-0165)

作者简介: 刘锦华(1983—),男,福建武平人,硕士生,liujh2008@gmail.com.

1 机构介绍

如图1所示,本机器人由前导机构、爬升机构、支撑机构和车架4部分组成.其中前导机构为一个单边固定在车架上的四边形机构,在越障过程中起关键作用;爬升机构为两边对称的2个平行四边形机构,越障中在前导机构的基础上进一步提升车体重心;支撑机构固定在车架上,在越障过程中起支撑推进作用.前导机构和支撑机构各有一个驱动轮构成,并分别用一个舵机控制其转向,使机器人可以原地转弯.爬升机构的每个平行四边形机构都有2个驱动轮,通过铰链悬挂在机架上,可以绕着铰链旋转以适应各种地形,并且具有自稳特性.

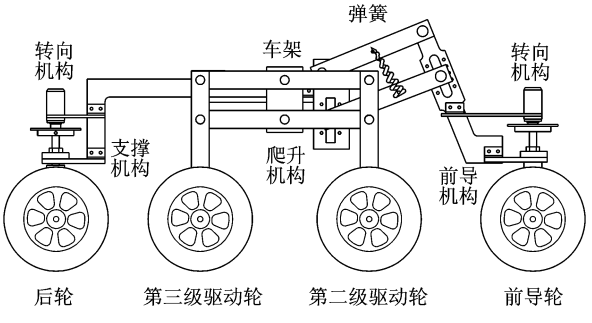


图1 自适应越障机器人

2 前导机构的分析与优化

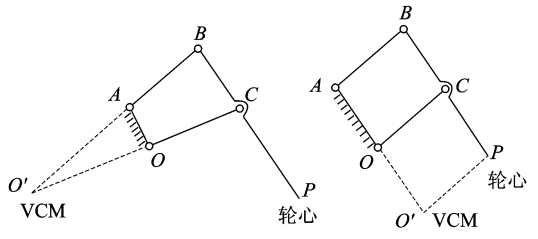
前导机构在机器人越障过程中起着至关重要的作用,主要体现在如下2方面:

1) 在前导轮接触障碍物的时候,前导机构将产生被动运动,使前导轮能够沿着障碍物外轮廓运动最终引导带动机器人整体翻越障碍物;

2) 四边形变形过程中将压缩其上安装的弹簧,弹簧的反作用力将保证车体六轮与地面的紧密接触.对前导机构的优化将从运动学和静力学2方面进行.

2.1 运动学分析与优化

如图2所示,前导四边形机构发生被动变形时,由于OA杆固定在车架上,OC杆和AB杆将分别绕着O和A点转动.根据速度瞬心理论,对于普通四边形机构,BP杆上的任意一点在任意时刻都绕着CO和BA延长线的交点O'旋转,见图2a;对于平行四边形机构,BP杆上任意一点都绕着过这一点的OC的平行线与OA交点O'旋转,见图2b.O'即BP杆的虚拟运动中心[6-7],简称VCM.



a 普通四边形 b 平行四边形

图2 前导机构机构简图

自适应越障机器人往前移动过程中,前导机构首先接触到障碍物.假设障碍物为竖直台阶,则前导轮将沿着竖直台阶外轮廓运动,前导轮心的速度方向将是竖直向上的.对其进行VCM简化,如图3所示,轮心的运动$\boldsymbol{V}$可以分解为随着车架的水平运动$\boldsymbol{V}_1$和绕着VCM的转动$\boldsymbol{V}_2$.根据速度合成原理,VCM必须位于轮心所在水平线下方.推广到一般情况,VCM的有效区域与各种障碍物的关系如图4所示.可见,3类障碍物越障的难度是递增的,其中图c类障碍物比较少见,本文重点以$\delta=0°$即竖直台阶型障碍物进行越障分析.

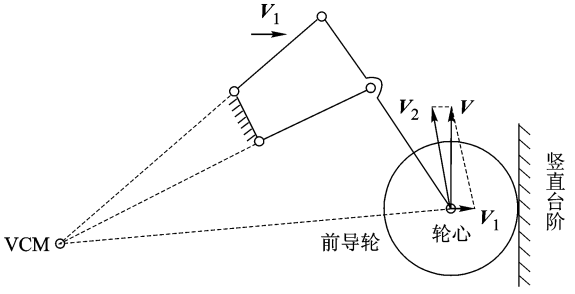


图3 前导机构VCM简化图

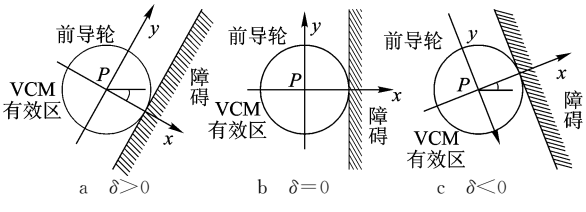


图4 VCM有效区域与轮心的关系

如图5建立前导机构运动简图,记杆OA,OC,BC,AB,CP的长度为b,c,d,e,h.

由图中几何关系可以获得如下轮心P和虚

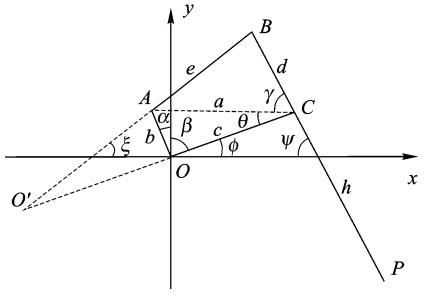


图5 前导机构运动简图

拟运动中心 O' 关于角度 ϕ 的坐标表达式:

$$\left.\begin{aligned} P(\phi)&=\begin{pmatrix} c\ \cos\phi+h\ \cos\psi \\ c\ \sin\phi-h\ \sin\psi \end{pmatrix} \\ O'(\phi)&=\begin{pmatrix} \dfrac{b(\cos\alpha+\sin\alpha\tan\xi)}{\tan\phi-\tan\xi} \\ \dfrac{b(\cos\alpha+\sin\alpha\tan\xi)\tan\phi}{\tan\phi-\tan\xi} \end{pmatrix} \end{aligned}\right\} \quad (1)$$

式中角度 ξ,ψ 关于 ϕ 的表达式可由式(2)求得:

$$\left.\begin{aligned} \beta(\phi)&=\frac{\pi}{2}-\phi \\ a(\phi)&=\sqrt{b^2+c^2-2bc\ \cos(\alpha+\beta)} \\ \theta(\phi)&=\arcsin\left(\frac{b\ \sin(\alpha+\beta)}{a}\right) \\ \gamma(\phi)\gamma&=\arcsin\left(\frac{a^2+d^2-e^2}{2ad}\right) \\ \psi(\phi)&=\theta+\gamma-\phi \\ \zeta(\phi)&=\pi-\arccos\left(\frac{d^2+e^2-a^2}{2de}\right)-\psi \end{aligned}\right\} \quad (2)$$

根据实际安装空间需要,取定 $b=50$ mm,由式(1)提出结构优化设计变量:

$$\boldsymbol{Z}=[\alpha,c,d,e,h\ ]^{\mathrm{T}} \quad (3)$$

使目标函数 $H(\boldsymbol{Z})=\max P_y(\boldsymbol{Z})-\min P_y(\boldsymbol{Z})$ 取得最大值,且满足下列约束方程:

几何约束:

$$\begin{cases} \alpha=i_1/2 & i_1=0,1,\cdots,30 \\ c=40+i_2 & i_2=0,1,\cdots,100 \\ d=50+i_3 & i_3=0,1,\cdots,30 \\ e=40+i_4 & i_4=0,1,\cdots,100 \\ (b=d)\cap(c=e)=\varnothing \\ b+c>e \\ b+e>c \\ h=230-d \end{cases}$$

位移约束:

$$\left.\begin{aligned} &P_x(\boldsymbol{Z})-O'_x(\boldsymbol{Z})>0 \\ &P_y(\boldsymbol{Z})-O'_y(\boldsymbol{Z})>0 \\ &\phi=i_5/10 \qquad i_5=0,1,\cdots,1\,100 \end{aligned}\right\} \quad (4)$$

根据上述数学表达式,用 matlab 在约束条件内通过数值搜索方法求得最优解:

$\boldsymbol{Z}=[\alpha,c,d,e,h\ ]^{\mathrm{T}}=[11.5,140,55,125,175]^{\mathrm{T}}$

此时轮心 P 的轨迹如图 6 所示,$H(\boldsymbol{Z})$ 取得最大值 271,也就是说优化后的前导机构越障能力可以达到 271 mm.

实际使用的轮子直径为 110 mm,理论上前导机构越障能力可以达到 2.47 倍轮子直径高度.考虑到实际中可能遇到 $\delta<0°$ 的障碍物,为了提高机器人的适应能力,需要将前导机构初始安装角度增大,以降低初始 VCM 的位置.实际样机前导机构初始安装角度为 $\phi_0=14.53°$,此时前导机构越障能力为 240 mm,约为轮子直径的 2.2 倍.

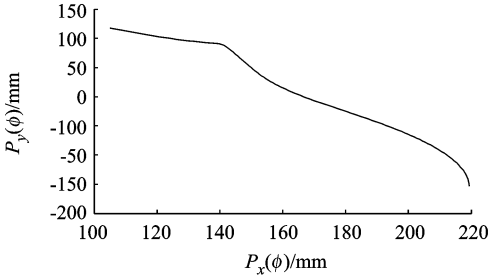


图 6　轮心 P 轨迹曲线

2.2　准静力学分析与优化

机器人在复杂地形中运行时,速度较慢,可以忽略其动力学因素的影响[8],对其进行准静力学分析.由于各杆件质量比较小,杆件的重力相对于其它力可以忽略.在没有弹簧的条件下,杆件 OC 和 AB 为简单的二力杆,受力方向沿着杆件.在这种情况下,前导四边形机构在复杂地面的静力学模型如图 7 所示.车架对杆件 OC 和 AB 的作用力 F_1 和 F_2 对于虚拟转动中心 O' 不产生力矩.前导机构在越障过程中,前导轮不打滑的条件是静摩擦系数 μ 小于最大静摩擦系数,假定电机扭矩一定,则轮子所需的静摩擦系数越小越有利.分析静摩擦系数与前导机构状态的关系具有重要意义.对机构整体进行受力分析,可以建立方程组(5).

$$\left.\begin{aligned} &(mg-N\ \sin\delta-f\ \cos\delta)\cdot \\ &\qquad(P_x(\phi)-O'_x(\phi))= \\ &(N\ \cos\delta-f\ \sin\delta)\cdot(P_y(\phi)-O'_y(\phi)) \\ &f=\mu N \\ &M=fR \end{aligned}\right\} \quad (5)$$

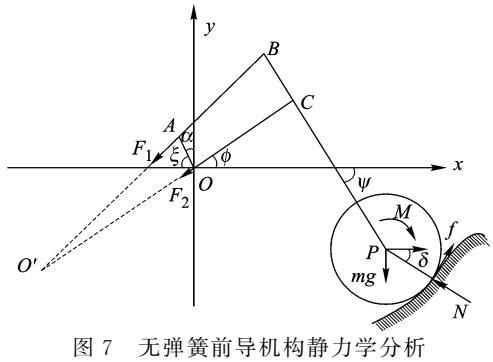


图 7　无弹簧前导机构静力学分析

令 $\begin{cases}\Delta X(\phi)=P_x(\phi)-O'_x(\phi)\\ \Delta Y(\phi)=P_y(\phi)-O'_y(\phi)\end{cases}$,假定越障过程中前轮电机的驱动力矩 M 是恒定的,解方程组(5),可以得到:

$$\mu(\phi)=\frac{M(\Delta X\sin\delta+\Delta Y\cos\delta)}{mgR\Delta X-M(\Delta X\cos\delta-\Delta Y\sin\delta)} \tag{6}$$

在杆件 OC 和加上弹簧之后建立前导机构的静力学模型，如图 8. 由于弹簧的作用，杆件 OC 和 AB 受到 3 个力. 将车架对杆件 OC 和 AB 的作用力分别分解为沿对应杆方向和垂直于对应杆方向 2 个力. 弹簧安装位置为 c_1 和 e_1，并设弹簧弹性系数为 k，初始预紧力为 F_0. 对弹簧单独进行受力分析，可以得到如下方程：

$$F(\phi)=F_0+k(n(\phi)-n(\phi_0)) \tag{7}$$

其中

$$\left.\begin{aligned}&a_1(\phi)=\sqrt{b^2+c_1^2-2bc_1\cos(\alpha+\beta)}\\&n(\phi)=[(b\sin\alpha+c_1\cos\phi-e_1\cos\xi)^2+\\&\qquad(b\cos\alpha-c_1\sin\phi+e_1\sin\xi)^2]^{1/2}\\&\lambda(\phi)=\arccos\left(\frac{n^2+e_1^2-a_1^2}{2n\cdot e_1}\right)\end{aligned}\right\} \tag{8}$$

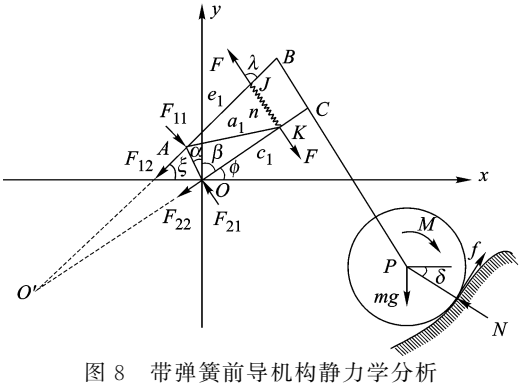


图 8 带弹簧前导机构静力学分析

对杆件 OC 和 AB 分别进行受力分析可得

$$\left.\begin{aligned}&F_{11}(\phi)=F\sin\lambda\cdot(e-e_1)/e\\&F_{21}(\phi)=F\sin(\lambda+\zeta-\phi)\cdot(c-c_1)/c\end{aligned}\right\} \tag{9}$$

对机构整体进行受力分析，根据平衡条件对于虚拟转心 O' 可以得到方程组(10)，其中 $|AO'|$ 和 $|OO'|$ 分别为 A 和 O 与 O' 之间距离：

$$\left.\begin{aligned}&(mg-N\sin\delta-f\cos\delta)\cdot\Delta X+\tau=\\&\qquad(N\cos\delta-f\sin\delta)\cdot\Delta Y\\&\tau(\phi)=F_{11}\cdot|AO'|-F_{21}\cdot|OO'|\\&f=\mu N\\&M=fR\end{aligned}\right\} \tag{10}$$

同样假定越障过程中前轮电机的驱动力矩 M 是恒定的，由方程(7)～(10)可以解得：

$$\mu(\phi)=\frac{M(\Delta X\sin\delta+\Delta Y\cos\delta)}{mgR\Delta X+\tau R-M(\Delta X\cos\delta-\Delta Y\sin\delta)} \tag{11}$$

根据实际条件取前轮驱动力矩为 0.3 N·m，取竖直台阶情况进行考虑，即 $\delta=0°$，由式(6)和式(11)绘出如图 9 所示摩擦系数 μ 随角度 ϕ 的变化曲线. 从图中可以看出，加弹簧后前导轮在越障过程中所需的摩擦系数显著减小，效率增高.

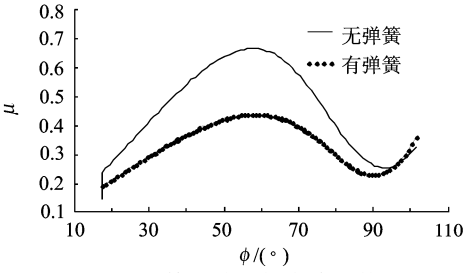


图 9 弹簧对前导轮摩擦系数影响

假设爬升机构和支撑机构各轮受到地面的支反力和摩擦力也相同，并且每个电机的扭矩恒定为 M_1. 在该前提下对机器人整体进行分析，如图 10 所示，可以得出如下方程组：

$$\left.\begin{aligned}&5N_1+N\sin\delta+f\cos\delta=6mg\\&5f_1+f\sin\delta-N\cos\delta=0\\&f_1=\mu_1N_1\\&M_1=f_1R\end{aligned}\right\} \tag{12}$$

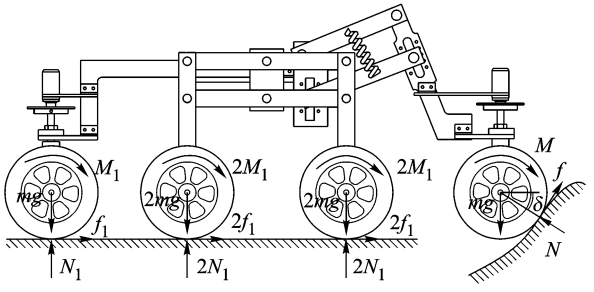


图 10 整车受力分析

由式(12)可以解得：

$$\mu_1(\phi)=\frac{5M_1B}{6mgRB-5M_1A} \tag{13}$$

其中，$A(\phi)=\sin\delta+\mu\cos\delta$；$B(\phi)=\cos\delta-\mu\sin\delta$.

取 $M_1=0.3$ N·m，$\delta=0°$，根据式(11)可以得出后轮摩擦系数 μ_1 随角度 ϕ 的变化曲线如图 11 所示. 从图中可以看出弹簧改善了后轮力学性能.

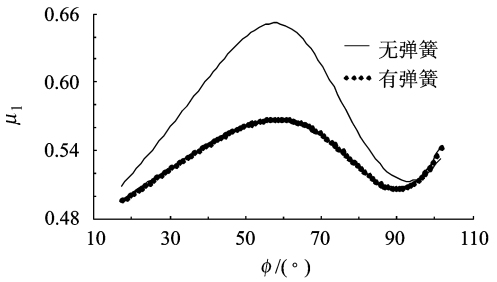


图 11 弹簧对后轮摩擦系数影响

由式(6)和式(7)可以看出弹簧安装位置不

同,将影响弹簧的长度变化,从而影响机器人的受力状态和越障能力.为确定弹簧最优的安装参数,可以通过先取定 c_1,再用无穷列举的方式确定 e_1 最优的安装位置,使越障过程中所需的地面摩擦系数变化最小.

取定 $c_1=125$ mm,假设 $t=e_1/c_1$,使 t 在 0.4～1范围内变化,可以得到如图 12 和图 13 所示曲面.图 12 是弹簧安装位置对前导轮摩擦系数影响,图 13 是弹簧安装位置对后导轮摩擦系数影响.从图 12 和图 13 可以看出 $t=0.4$ 时,地面对车轮摩擦系数最小,此时机器人力学性能最好.

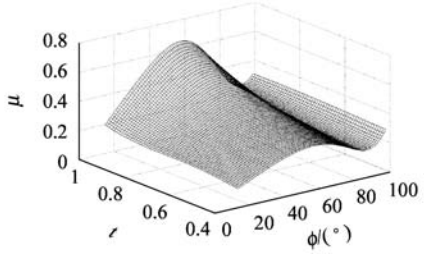


图 12　弹簧安装位置对 μ 影响

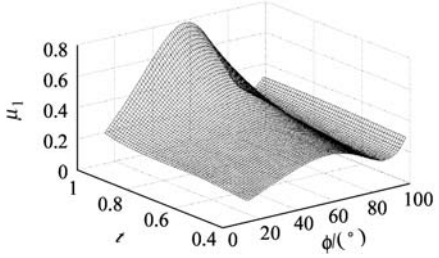


图 13　弹簧安装位置对 μ_1 影响

3　越障和自适应试验

优化前后样机的轮子直径都约为 110 mm,分别对其进行了越障能力验证试验.优化前样机单阶竖直台阶的越障能力约为 168 mm;同等条件下优化后样机可平稳翻越 230 mm 的单阶竖直台阶,约为 2.1 倍轮高.图 14 为样机在进行越障试验.

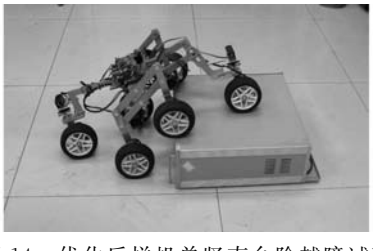


图 14　优化后样机单竖直台阶越障试验

优化后的样机进行了翻越连续台阶试验.试验中,优化后的样机可以连续平稳地翻越宽 350 mm,高 140 mm 的楼梯.

4　结　论

通过机构的被动运动来自适应地形的方式,简化了机器人系统的控制,并增强了机器人适应复杂地形的能力.自适应越障机器人的前导机构在机器人越障过程中具有至关重要的作用.试验证明,通过优化前导机构的 VCM 与前导轮心的位置关系增强了机器人的越障性能和地面适应能力.弹簧的合理安装可以提高机器人的力学性能.通过优化弹簧在前导机构的安装位置,在提高机器人整体力学性能的同时提高了机器人的越障能力和越障平稳性.

参考文献(References)

[1] Granda C,Ben A F,Bidaud P. Kinematic analysis and stability optimization of a reconfigurable legged-wheeled mini rover [J]. Proceedings of SPIE,2002,4715: 295－302

[2] Grand C,Ben A F,Plumet F,et al. Stability and traction optimization of a reconfigurable wheel-legged robot[J]. The International Journal of Robotics Research, 2004, 23(10/11):1041－1058

[3] Morales R,Feliu V,Gonzalez A,et al. Kinematic model of a new staircase climbing wheelchair and its experimental validation[J]. The International Journal of Robotics Research, 2006,25(9): 825－841

[4] Lagnemma K,Rzepnivewski A,Dubowsky S. Control of robotic vehicles with actively articulated suspensions in rough terrainl[J]. Autonomous Robots,2003,14:5－16

[5] Fiorini P. Ground mobility systems for planetary exploration[C]//Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics & Automation. Piscataway, NJ: IEEE, 2000:908－913

[6] Thueer T,Lamon P,Krebs A,et,al. CRAB-exploration rover with advanced obstacle negotiation[C]//9th ESA Workshop on Advanced Space Technologies for Robotics. Netherlands: Astrionic Press, 2006

[7] Roland S,Pierre L,Thomas E,et al. Innovative design for wheeled locomotion in rough terrain[J]. Robotics and Automous Systems,2002,40(2/3):151－153

[8] 陈世荣,许旻,杨杰. 双曲柄机构在移动机器人中的应用与优化[J]. 中国机械工程,2007,18(10): 1141－1142
Chen Shirong,Xu Min,Yang Jie. Design and optimization of fork using in robot[J]. China Mechanical Engineering,2007, 18(10):1141－1142(in Chinese)