

高机动越障机器人攀登机构的关键问题解析*

汪新, 杨栋, 许旻, 范明聪, 吴月华, 杜华生, 杨杰

(中国科学技术大学精密机械与精密仪器系, 安徽合肥 230027)

摘要:介绍了一种适合于野外非结构环境下的移动机器人, 它由双曲柄加弹簧的攀登机构和两个四边形高架机构的组合变形机构组成, 越障过程表现出足与轮的双重功能, 具有很强的自越障能力. 基于六轮高机动性越障机器人, 对攀登机构进行了力学建模, 采用 ADAMS 仿真和实验法, 对攀登机构的结构参数进行了优化, 并采用虚位移原理对有弹簧和无弹簧的力学分析进行了比较, 定量地分析验证了弹簧在越障过程中所起的至关重要的作用.

关键词:攀登机构; 优化设计; 双曲柄机构; 虚位移原理

中图分类号: TH39

文献标识码: A

0 引言

非结构环境中的多功能全自主的移动机器人技术多年来一直是机器人研究中的热点问题之一. 但是非结构环境给移动机器人的运动造成了自主决策和路径规划的困难. 针对各种不同的运动环境, 一直以来移动机器人所采用的运动方式大体包括轮式、履带式、足式等. 美国卡耐基—梅隆大学和美国航天航空局联合研制的两足步行机器人 Dante^[1], 具有较好的跨越障碍的能力, 且在很大一个范围内能够保持稳定, 故适合在不规则的环境下工作. 但是它的缺陷在于结构复杂, 难以控制. 欧洲航天局计划发往火星的履带式机器人 Nanohod^[2] 移动时与地面有很好摩擦系数, 稳定性也很高, 具有很好的越障能力, 且结构简单. 但是在转弯时会存在很大的摩擦损失, 机动性较差. 轮式机器人如美国航天航空局研制的 Nanorover^[3] 和日本航天航空中心研制的 Micro5^[4] 在道路、居民点这类平坦规则的环境是最佳选择, 在摩擦足够大的情况下也可以越过小于轮子半径的障碍物. 以上三种运动方式分别在不同的地形具有较好的越障能力.

近来出现的复合式移动机器人如美国航天航空局派往火星的 Sojourner^[5], 结合了不同运动方式的优点, 因此在很大程度上提高了单纯轮式或履带式移动机器人的地形适应能力.

笔者所在的实验室对轮式移动机器人的变形机构进行了研究和开发, 设计了双曲柄与两个四边形高架结构相结合的六轮机器人, 实现了被动式直接翻越高于轮子直径 1.5 倍的垂直障碍物的目标, 可以期望将在今后的星球探测、反恐防暴和地震救灾等场合得到广泛应

* 收稿日期: 2004-05-26

基金项目: 国家“863”(2001AA422410)资助项目.

作者简介: 汪新, 男, 1980年生, 硕士. 研究领域: 精密机械及仪器.

用. 本文主要介绍对攀登机构优化设计的一种方法以及在攀登机构中弹簧对机器人越障过程所起的重要作用.

1 高机动越障机器人的机构简介

高机动越障机器人有六个独立的驱动轮. 其中, 最前面的驱动轮起方向导引作用, 称为导引轮. 如图 1 所示, 导引轮与车体之间由一个四边形双曲柄机构相连, 车体上两侧各有一个高架的四边形机构, 后轮与车体之间也以四边形机构相连, 这三组机构分别称为攀登机构、爬升机构与稳定机构. 当机器人的导引轮遇到障碍时(如图 1 所示), 由于连接导引轮的倾斜支杆的作用, 导引轮将受到向上的摩擦力 F_5 , 实现攀越的动作. 当车体前轮与障碍相遇时, 由于导引轮向上向前的作用, 将受到向上爬升的分力. 同样的, 车体中间轮及后轮遇到障碍时也会受到类似的向上爬升的分力作用, 整个车体可以灵巧地攀越高于导引轮 1.5 倍高度的障碍, 研制出的高机动越障机器人的六轮直径相同, 均为 110mm, 当遇到垂直高度为 165 mm 的障碍物时, 机器人无需避障, 也不用另加控制即可直接翻越.

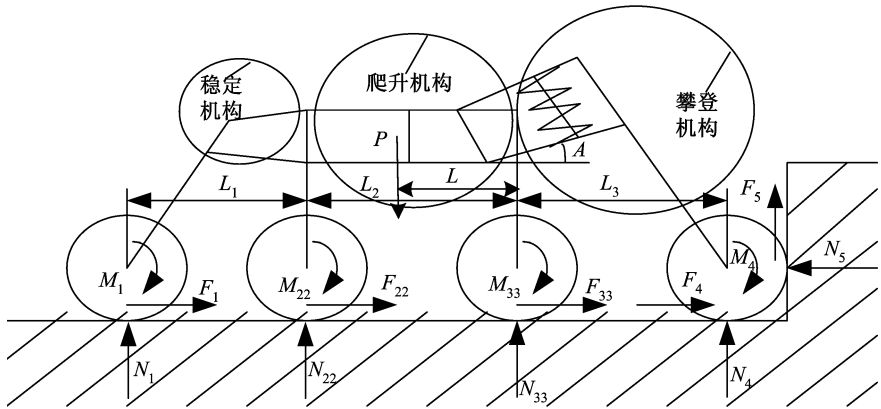


图 1 机器人受力分析图

Fig. 1 Force analysis of robot

2 攀登机构的优化设计

要实现机器人越障能力的最大化, 必须在设计时对攀登机构进行优化. 为了方便起见, 将攀登机构简化为图 2(b)所示的力学模型.

由几何分析可得以下参数:

$$\alpha(A) = \frac{\pi}{2} - A + \phi, a(A)^2 = b^2 + c^2 - 2bc \cos \alpha,$$

$$\delta(A) = \arccos\left(\frac{a^2 + d^2 - e^2}{2ad}\right), \beta(A) = \arccos\left(\frac{c^2 + a^2 - b^2}{2ac}\right),$$

$$\psi(A) = \delta + \beta,$$

$$\xi(A) = \psi - A.$$

所以导引轮轮轴中心(即图 2 中 P 点)的运动轨迹为

$$\left. \begin{aligned} x_p(A) &= c \cos(A) + h \times \cos[\xi(A)] \\ y_p(A) &= c \sin(A) - h \times \sin[\xi(A)] \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

由式(1)可知, P 的运动轨迹是两个 A 为变量的方程。

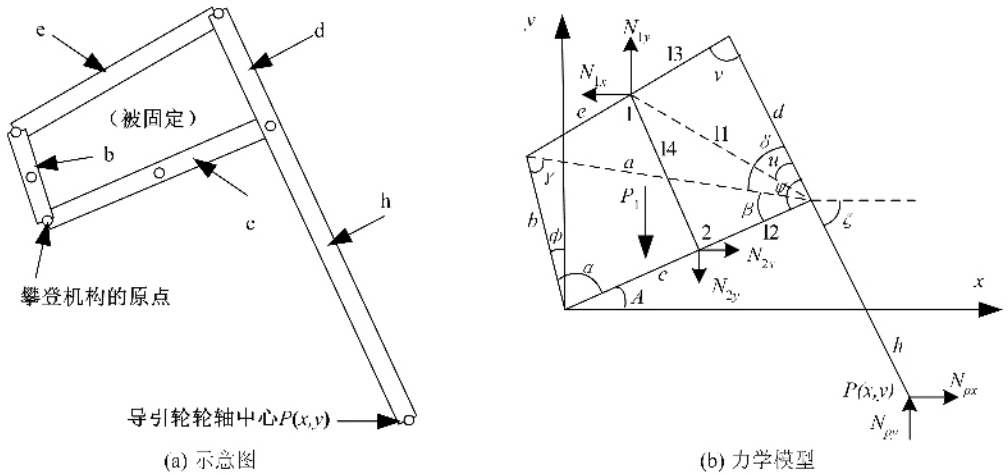


图 2 攀登机构

Fig. 2 The climbing structure

只要将方程中的 b 、 c 、 d 、 e 、 h 和 ϕ 六个未知量进行优化取值,就能得到较完美的结果. 攀登机构的设计目标是能平稳越过轮子直径 1.5 倍高度的障碍. 现已知轮子的直径 D 为 110 mm, 攀登机构被放置在离地 165 mm 的车体上, 整个机器人长度小于 660 mm. 从车体的一体化设计考虑, b 的垂直高度就决定了车体上能放置控制系统硬件的空间的高度, 控制系统要求 b 不小于 50 mm, $\phi = 30^\circ$, 这里取 $b = 50$ mm. 这样方程中就还存在 c 、 d 、 e 、 h 四个未知量, 此时就可以采用无穷列举的方法再加上相应的约束条件来得到方程的最优解. 第一个约束条件是: 为了使攀登机构能平稳开始越障, 前轮碰到障碍时瞬时速度必须是竖直方向, 反映在 P 点的运动轨迹上, 就是轨迹起点的切线方向必须是竖直方向. 第二个约束条件是: 为了防止开始越障时逆振现象的发生, 轨迹起点对应的 A 的值要不小于 0. 第三个约束条件是: 为了满足爬升机构和稳定机构的长度要求, 轨迹的水平方向的跨越长度是车身长的三分之一左右即 220 mm. 第四个约束条件是: 为了使攀登机构的越障高度最大, 轨迹的垂直方向的跨越长度要最大, 且水平方向的跨越长度不能太大, 以免影响机器人的速度. 图 3 展示了攀登机构优化设计的过程. 图 3c 中的三条曲线都满足前三个约束条件, 曲线 1 的水平方向的跨越长度最长(120 mm), 垂直方向的跨越长度较长(165 mm), 按此曲线的参数设计的攀登机构在三条曲线中越障速度最慢, 越障高度较大; 曲线 2 的水平方向的跨越长度最短(10 mm), 垂直方向的跨越长度最短(135 mm), 按照此曲线的参数设计的攀登机构越障最快但越障高度最低; 曲线 3 的垂直方向的跨越长度最长(172 mm), 水平方向的跨越长度较短(90 mm), 按照此曲线的参数设计的攀登机构越障较快而且越障高度最高, 对比第四个约束条件, 曲线 3 便是攀登机构的最优方案.

3 攀登机构上的弹簧的作用

攀登机构上的弹簧对整个机器人的越障起了非常重要的作用. 下面将从无弹簧和有弹簧这两方面分别对机器人进行力学分析, 通过对比得出弹簧的重要性.

首先分析有无弹簧对越过障碍后导引轮的摩擦力和弹力的影响. 根据虚位移原理, 把 A 作为广义坐标, 便可求出无弹簧时的 N_{px} 和 N_{py} 的值, 如式(2)所示.

$$\left. \begin{aligned} N_{px} &= \mu N_{py} \\ N_{py} &= \frac{m_1 g \frac{\partial y_m}{\partial A}}{\mu \frac{\partial x_p}{\partial A} + \frac{\partial y_p}{\partial A}} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

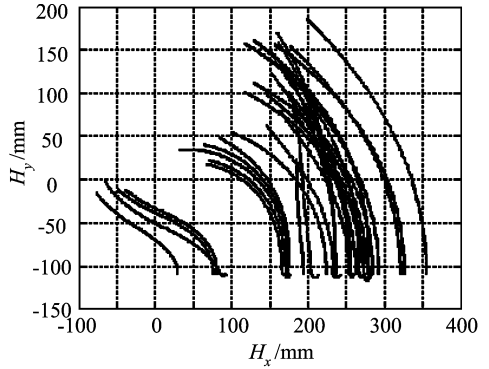
上式中, N_{px} 和 N_{py} 是导引轮轮轴所受到的约束反力, 它们与导引轮翻越障碍后与地面的摩擦力和弹力大小相等, 方向相同, $\frac{\partial y_m}{\partial A}$ 、 $\frac{\partial x_p}{\partial A}$ 和 $\frac{\partial y_p}{\partial A}$ 分别是重心的纵坐标、 p 点的横坐标和 p 点的纵坐标对 A 的导数. y_m 的计算公式如下所示:

$$y_m = \frac{m_c y_e + m_c y_c + m_{dh} y_{dh} + m_p y_p}{m_e + m_c + m_{dh} + m_p}. \quad (3)$$

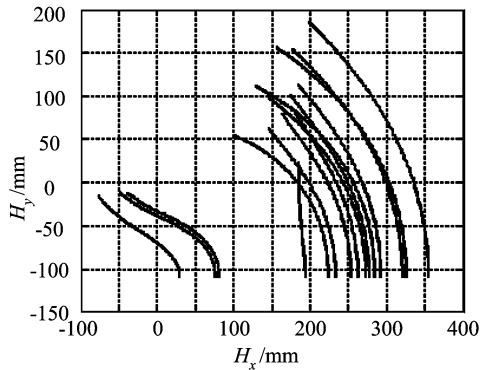
在有弹簧的情况下, 根据虚位移原理, 解除弹簧的约束并以约束反力 N_{1x} 、 N_{2x} 、 N_{1y} 和 N_{2y} 代替, 便可得 N'_{px} 和 N'_{py} , 如(4)所示.

$$\left. \begin{aligned} N'_{px} &= \mu N'_{py} \\ N'_{py} &= \frac{m_1 g \frac{\partial y_m}{\partial A} + \frac{N_{1x} \frac{\partial x_1}{\partial A} + N_{2y} \frac{\partial y_2}{\partial A}}{\mu \frac{\partial x_p}{\partial A} + \frac{\partial y_p}{\partial A}}}{\mu \frac{\partial x_p}{\partial A} + \frac{\partial y_p}{\partial A}} + \frac{N_{1y} \frac{\partial y_1}{\partial A} + N_{2x} \frac{\partial x_2}{\partial A}}{\mu \frac{\partial x_p}{\partial A} + \frac{\partial y_p}{\partial A}} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

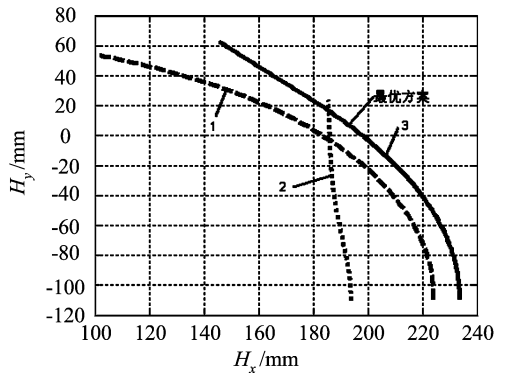
将攀登机构的优化设计结果代入式(2)和式(4)便可得有弹簧时的导引轮的摩擦力和弹力的对比结果, 如图 4 所示. 图中横坐标是 A 角, 纵坐标是 N_{px} , 曲线 1 是无弹簧时



(a) 无穷列举之后满足第一个约束条件的结果



(b) 无穷列举之后满足第一、二个约束条件的结果



(c) 无穷列举之后满足第一、二、三个约束条件的结果

最优方案: $h=165$ mm, $b=50$ mm, $c=140$ mm, $d=65$ mm, $e=130$ mm

图 3 攀登机构优化过程

Fig. 3 Optimization process of the climbing structure

的情况,曲线 2 是有弹簧时的情况. 曲线 1 基本上位于曲线 2 的下方,并且随着横坐标的增加,两曲线在纵坐标上的距离变大,说明有弹簧时导引轮受到的摩擦力更大,更能发挥带动整个机器人越障的作用.

接着分析有无弹簧对爬升机构和稳定机构的影响. 由图 1 可知,当攀登机构开始越障

时,导引轮抬起,有 $N_4=0, F_4=0$,对支撑轮轮轴求矩,即 $\sum M_0=0$,可以得到:

$$N_{22} = N_{33} = \frac{Mg \Delta L}{2L1 + L2} - \frac{F_5 [L1 + L2 + L3 + (r + \Delta h) / \mu]}{2L1 + L2}, \quad (5)$$

$$N_1 = \frac{Mg(2L1 + L2 - 2\Delta L)}{2L1 + L2} - \frac{F_5 [4L1 + 3L2 + 2L3 + (2r + 2\Delta h) / \mu]}{2L1 + L2}. \quad (6)$$

式中, Δh 是攀登机构爬升的高度, M 是机器人的质量, M 是机器人重心到车体前轮轮心的水平距离.

水平距离.

有无弹簧的区别在于 F_5 发生了变化. 无弹簧时,根据能量守恒定律,就有 $F_5 \Delta h - m_1 g \Delta h = 0$,式中 m_1 为攀登机构的质量,这样便可得出

$$F_5 = m_1 g. \quad (7)$$

有弹簧时,不仅攀登机构的重力在做功,弹簧的弹力也在做功,因此就有 $F'_5 = \Delta h + \frac{k \Delta x^2}{2} -$

$m_1 g \Delta h = 0$,其中 Δx 为弹簧的变形长度,这样便可得:

$$F'_5 = m_1 g + k \Delta x^2 / (2 \Delta h), \quad (8)$$

因此 F_5 在有弹簧时比在无弹簧时多了一个正的弹簧作用量 $k \Delta x^2 / (2 \Delta h)$,数值上发生了极大的变化,从而使得有弹簧时 N_{22} 和 N_{33} 在数值上比无弹簧时小的多,而 N_1 在数值上比无弹簧时大得多. 将式(7)和式(8)代入式(5)和式(6),并代入攀登机构的优化设计结果,可得图 5 和图 6.

图 5 的横坐标是 A 角,纵坐标是 N_{22} ,曲线 1 是无弹簧时的情况,曲线 2 是有弹簧时的情况. 曲线 1 基本上位于曲线 2 的上方,并且随着横坐标的增加,两曲线在纵坐标上的距离变大,这说明车体前后轮在有弹簧时受到的压力更小,从而使爬升机构更容易爬上障碍物.

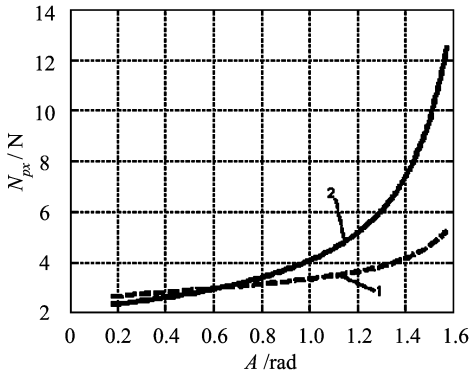


图 4 有无弹簧时的导引轮受到的摩擦力 N_{fr} 的比较

Fig. 4 Comparison of N_{fr} with spring and without spring

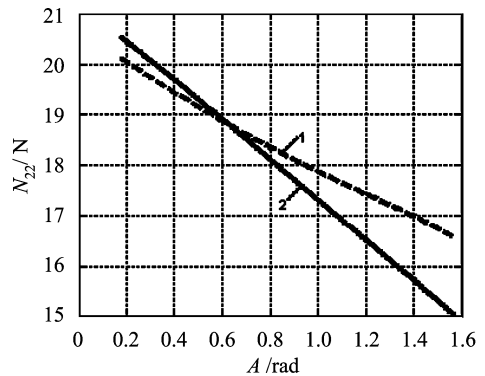


图 5 有无弹簧时的车体前后轮受到的压力 N_{22} 的比较

Fig. 5 Comparison of N_{22} with spring and without spring

图 6 的横坐标也是 A 角,纵坐标是 N_1 ,曲线 1 是无弹簧时的情况,曲线 2 是有弹簧时的情况.曲线 1 基本上位于曲线 2 的上方,随着横坐标的增加,两曲线在纵坐标上的距离变大,说明稳定轮在有弹簧时受到的压力更大,更能使机器人稳定越障.

综上所述,与无弹簧时相比,攀登机构有弹簧时不仅在导引轮越过障碍以后能够更多的增加导引轮的摩擦力,从而充分发挥导引轮带动整个机器人越障的作用,而且能更大的减少爬行机构的压力,增加稳定机构的压力,使整个机器人顺利越过障碍.

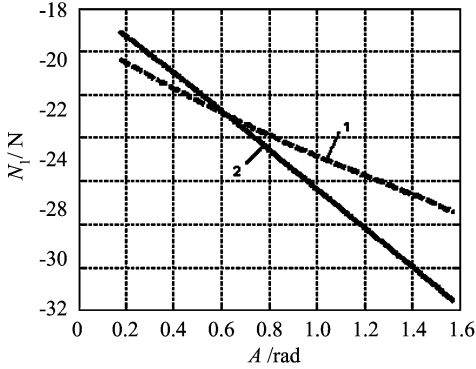


图 6 有无弹簧时的稳定轮受到的压力 N_1 的比较

Fig. 6 Comparison of N_1 with spring and without spring

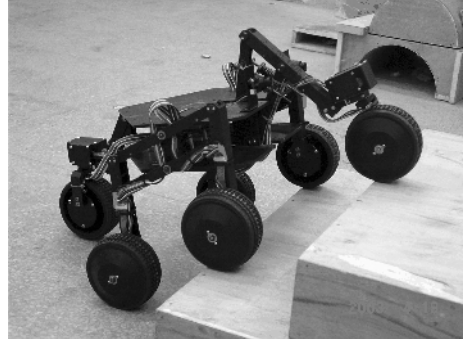


图 7 高机动越障机器人实物图

Fig. 7 Photo of high mobile over-obstruct robot

4 结论

通过力学建模及理论计算,经仿真验证了自行设计的六轮移动机器人确实具有很强的自越障能力.机构设计参数的有效优化,弹簧和攀登机构的有效组合,实现了越障能力的最大化.研制成的高机动越障机器人如图 7 所示,车轮直径为 110 mm,在试验中机器人稳定轻松地越过了 172 mm 高的垂直障碍,完全满足最初的设计指标.

参 考 文 献

- [1] Bares J, Wettergreen D. Lessons from the development and deployment of Dante II [A]. Proceedings of the 1997 Field and Service Robotics Conference[C], 1997.
- [2] Van Winnendael M, Visenti G, Bertrand R, rieder R. Nanokhod micro-rover heading towards mars[A]. Proceedings of Fifth International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space (ESA SP-440)[C], 1999,69-76.
- [3] Tunstel E. Evolution of autonomous self-righting behaviors for articulated manovers [A]. Proceedings of Fifth International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space (ESA SP-440)[C], 1999,341-346.
- [4] Kubota T, Kuroda Y, Kunii Y, Natakani I. Micro planetary rover Micro5[A]. Proceedings of Fifth International Symposium on Artificial Intelligence Robotics and Automation in Space(ESA SP-440)[C],1999,373-378.
- [5] Stone H W. Mars Pathfinder Microrover. A Low-cost, Low-power spacecraft[A]. Proceedings of the 1996 AIAA Forum on Advanced Developments in Space Robotics[C], Madison W1, 1996.

Modeling and Model Reduction of Intelligent Paraboloid Truss Antenna

WANG Yong¹, MA Yun-ling¹, CHEN Bin¹, SUN Hong-ling², ZHANG Pei-qiang²

(1. Department of Automation, USTC, Hefei 230027, China; 2. Department of Mechanics and Mechanical Engineering, USTC, CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Material, Hefei 230027, China)

Abstract: An intelligent paraboloid truss antenna is designed and its dynamic model is presented by means of finite element method. The model has a higher order, which brings a lot of difficulties in our later work of vibration control. Then the high order model was reduced by the modal aggregation method. The order-reduced results are verified by comparing the zeros, poles and outputs curves before and after the order reduction and applying the linear quadratic optimal control law for low-order model to the high-order model.

Key words: intelligent truss antenna; vibration control; finite element method; modeling; model reduction; linear quadratic optimal control

(上接 511 页)

Key Problem Analysis of the Climbing Structure of Highly Mobile Over-Obstruct Robots

WANG Xin, YANG Dong, XU Min, FAN Ming-cong
WU Yue-hua, DU Hua-sheng, YANG Jie

(Department of Precise Machine and Precise Instrument, USTC, HeFei 230027, China)

Abstract: This paper presents a mobile robot which is adaptive to unknown unstructured environments. It includes a combined transformed structure consisting of a climbing structure with double cranks and springs and two high-position quadrangles. The combination of wheels and feet has been realized so that the structure has strong self over-obstruct ability. Based on the six-wheel highly mobile over-obstruct robot, a mechanical model of the climbing structure is constructed and a method of optimization is presented for the structure parameter of the climbing structure with ADAMS simulation tool and experiment means. Subsequently, a comparison of the mechanical analysis of cranks with and without springs is performed by the principle of virtual displacement which analyses quantitatively and verifies the important effect of climbing structures' springs during over-obstruct process.

Key words: climbing structure; optimization design; double-crank structure; principle of virtual displacement