轮式腿型机器人的越障分析与仿真

陈殿生 黄 宇 王田苗

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院，北京 100191)

摘 要：为了提高地面移动机器人的地面适应性和越障能力，通过模仿昆虫的腿形，在移动机器人机械本体上设计了一种轮式腿结构.同时选择了轮式腿结构布局的最优方案，提高了机器人运动的平稳性.针对该种结构在非结构环境中的越障性能进行了相关的分析，从理论上分析了具有轮式腿结构的机器人具有很强的越障能力和越障平稳性.并用 ADAMS (Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems) 对该机器人进行了运动学的仿真，仿真结果表明具有轮式腿结构的机器人具有较强的越障能力，可以翻越高度为轮式腿半径 1.2 倍的垂直障碍，验证了机构的可行性和越障原理的正确性，为轮式腿型机器人的进一步研究提供了理论基础和依据.

关 键 词：移动机器人；轮式腿结构；越障；运动学仿真

中图分类号：TP 242

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2009)03-0371-05

Obstacle climbing analysis and simulation of wheel-legged robot

Chen Diansheng Huang Yu Wang Tianmiao

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

Abstract: A wheel-legged structure with insectival leg configuration in a ground mobile robot was presented in order to improve the terrain adaptability and obstacle climbing capability of the robot. An optimal wheel-legged configuration which enhances the movement stability of the robot was selected. The obstacle climbing performance for the robot configuration under unstructured environment was analyzed, theoretically proving that this wheel-legged structure possesses good obstacle climbing ability and stability. Kinematic simulation using ADAMS (automatic dynamic analysis of mechanical systems) validates the strong obstacle climbing capability of the robot that can successfully climb over a vertical barrier whose height is 1.2 times of the wheel-leg radius, which proves the feasibility of the wheel-legs structure and the effectiveness of the obstacle climbing principle, laying a solid basis for future research of wheel-legged robots.

Key words: mobile robots; wheel-legged structure; obstacle climbing; kinematic simulation

小型移动机器人由于其特殊的需求已经成为特种机器人极为重要的分支.该种机器人具有可靠性高、适应性强、隐蔽性强、便于携带等特点，这使其成为执行侦察和高危险任务的理想平台.它们外型千姿百态，从无人驾驶的机器人战车到各种仿生外型的机器人装置.目前这些机器人已被广泛应用于各军事领域，尤其是排雷、拆除炸弹、侦察等危险工作，在未来也将肩负起更多的特殊任务.由于其应用的特殊性，机器人多数工作在人员无法靠近的高危险区域，面临着许多未知的地形，可能会遇到各种障碍物，这样就无法保证机器人完成相关的任务.因此提高移动机器人的地形适应性和越障能力已经成为一个重要的研究方向.

收稿日期：2008-03-18

基金项目：国家杰出青年科学基金资助项目(60525314)

作者简介：陈殿生(1969—)，男，吉林扶余人，教授，chends@163.com.

行走机构作为移动机器人的核心，其性能的优劣直接决定了整个移动机器人的移动性能和越障能力，因此设计出高性能的行走机构是移动机器人发展的必然要求[1]. 目前国内外机器人的行走机构按移动方式可以分为轮式、腿式、履带式等. 然而，它们各自都存在着相应的缺陷，轮式结构速度快，控制灵活，但越障能力有限. 腿式结构适应能力强，观赏性也好，但控制也最复杂，且不适于对灵活性、快速性要求高的场合. 履带式移动机器人重量大，能耗高等. 由于每种结构都有优缺点，如果将其中的2种或是多种结构相结合，发挥各自的优势，弥补彼此的不足，就可以使机器人的行走性能得到很大的改善.

近年来国外出现了一种模仿昆虫运动的结构，结构简单、轻便，可以在很小的重量和采用同样尺寸的条件下达到高于轮式、履带式结构的通过能力. 美国的凯斯西储大学研制的陆行移动机器人就是依靠这种称为轮式腿(Mini-whegs™)的仿生结构来进行运动的，该大学研制了超过7种具有这种结构的机器人[2-3]. 这种结构就是通过研究蟑螂的移动爬行而想到的，具有很好的仿生性，同时还具有很强的越障能力.

为了使移动机器人具有稳定性好、越障能力强、结构简单的特点. 采用了类似于轮式腿的仿生结构，该轮式腿型机构是将轮式和腿式结构有机的结合起来，具备了两者的优势，设计了机器人的移动机构，并对其进行了越障机理分析和仿真验证.

1 机器人轮式腿的设计与布局

机械系统是陆地移动机器人的基础，机械设计参数直接影响到机器人性能指标. 合理的、优化的机械设计不仅能提供可靠的机器人本体，更可以减少调试试验中的不可靠因素.

陆地移动机器人要求具有重量轻、结构紧凑、越障能力强的特点. 因此应综合考虑驱动元件的动态性能、各个部分的设计和布局、轮式腿的结构设计、可控性和性价比等因素. 用合理有效的方案来进行设计，轮式腿型机器人的整体结构如图1所示.

为了提高越障能力，将车轮设计成一个不完全轮式的结构. 为了兼顾运动的稳定性和越障能力，将不完全轮设计为如图2所示的结构. 在每个轮子上均匀分布3个腿式结构，彼此角度相差120°. 当腿式结构分布数量大于3个时，会影响机器人的越障能力；当小于3个时，会影响机器人运动的稳定性. 同时轮式腿结构简单，仿生性强，便于控制.

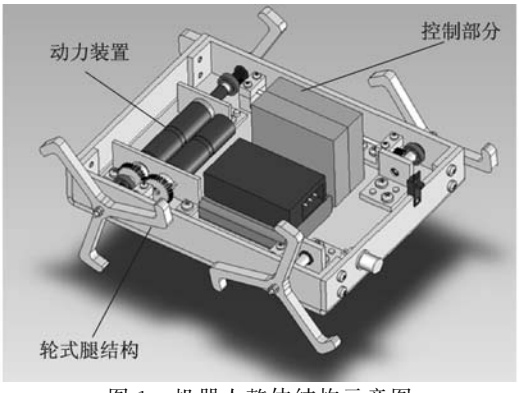

图1 机器人整体结构示意图

整个机器人使用2个MAXON的直流电机进行驱动，每个电机通过齿轮传动带动一边的轮式腿结构，这样不仅可以较好的控制机器人移动，还降低了机器人的质量，简化了整个控制系统.

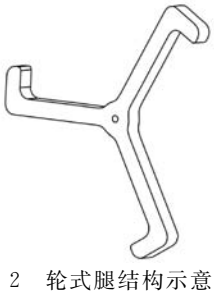
图2 轮式腿结构示意图

轮式腿结构的布局是使机器人的4个轮式腿彼此相邻的相差180°[3]，如图3所示. 当机器人运动时，对角的轮式腿结构同时落地，起到支撑整个身体的作用，这样就可以在运动中保持机器人的稳定性. 通过左右两侧轮式腿的差速控制，可以使陆行机器人完成直线行走和转向等运动.

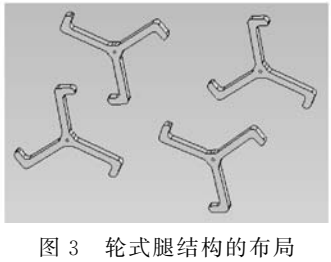
图3 轮式腿结构的布局

2 轮式腿型机器人越障性能分析

移动性是陆地移动机器人最基本和最重要的性能之一，它包括越障性、平顺性、地面自适应性、抗倾覆性、转向灵敏度等. 其中，越障性能也称为几何通过性，反映了具有轮式腿结构的机器人在非结构环境中克服几何障碍而正常通过各种地面和地形的行驶能力，是评价机器人的一个非常重

要指标.对机器人的越障性能分析可以从理论上了解越障原理,也是设计轮式腿结构的重要依据.

2.1　轮式腿结构越障过程分析

机器人的越障原理是轮式腿型结构前端与障碍物(将障碍物简化为具有一定高度的垂直障碍)接触后,在地面摩擦推力 f_1 和 f_2 的作用下,重心不断升高,同时机器人前后轮心连线与 x 方向的夹角 θ 不断变大,重心缓慢前移[4].

如图 4 所示在攀越这类台阶似的障碍物时,攀越成功的必要条件是重心 O 在行进方向上"超越"了翻越支点 A 点.此时重力提供了全部的翻转力矩,加快了重心的"超越",提供更大的翻转力臂,加速翻转过程.

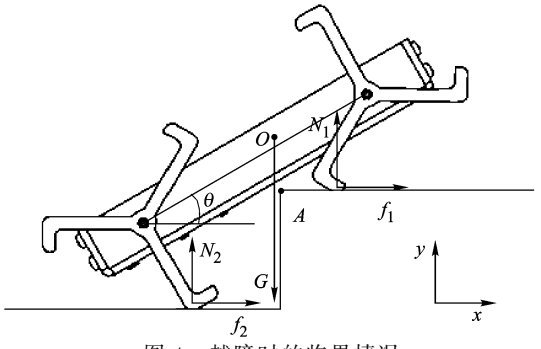

图 4　越障时的临界情况

2.2　越障动力学和极限越障高度分析

这种轮式腿相比轮式结构具有更强的越障能力,然而它的越障能力也是有一定的范围的,可以利用公式推导近似计算出该机器人的极限越障高度.假设越障时机构各部分不变形,可以越过障碍物的高度为 h,N_1 为地面对前轮的作用力,l_1 为整个机器人的长度,l_2 为前后轮心连线的距离,l_3 为前轮心到重心在 x 方向上的距离,极限越障情况如图 5 所示.

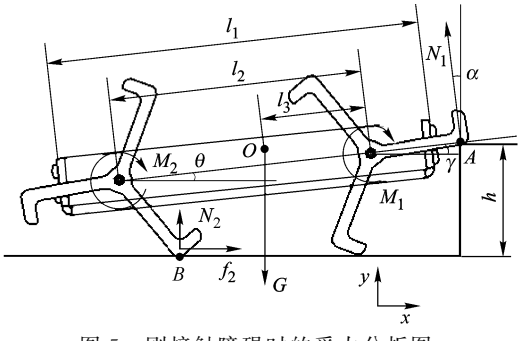

图 5　刚接触障碍时的受力分析图

按照所选电机的型号得到电机功率、转速、传动效率等参数,然后计算出电机的输出扭矩 T,因为一个电机带动一侧的轮式腿,传动齿轮的传动比为 1∶1,忽略摩擦等影响,所以可得等式:

$$M_1 \approx M_2 = T \tag{1}$$

当前轮接触障碍物,使前轮抬起时,前轮只在接触点处受地面对前轮的作用力,因为有 2 个电机驱动,所以因重力作用所产生的扭矩按一半的值进行计算处理.以 B 点为参考点,则有力矩平衡条件:

$$\begin{aligned} &N_1 \times \cos\alpha \times (r \times \cos\gamma + \\ &(l_2 - r \times \cos(\beta-\gamma)) \times \cos\theta) + \\ &N_1 \times \sin\alpha \times (r \times \sin\gamma + l_2 \times \sin\theta + \\ &r \times \sin(\beta-\gamma)) = \frac{1}{2} \times G \times \\ &((l_2 - l_3) \times \cos\theta + r \times \cos(\beta-\gamma)) \end{aligned} \tag{2}$$

其前轮的转矩为

$$\begin{aligned} M_1 = {} & N_1 \times \cos\alpha \times r \times \cos\gamma + \\ & N_1 \times \sin\alpha \times r \times \sin\gamma \end{aligned} \tag{3}$$

式(1)～式(3)中,r 为轮式腿的半径;β 为相邻腿型之间彼此夹角,按照前面轮式腿布局的要求可知该角度为 60°;α 为接触点反作用力与 y 方向的夹角;γ 为接触点和前轮心的连线与 x 方向的夹角;θ 为前后轮心连线与 x 方向的夹角.

由图 5 可知,α 和 γ 的角度近似相等,则有

$$\alpha \approx \gamma \tag{4}$$

当 $\theta=0°$ 时,M_1 具有极大值[5].即当前轮刚刚抬起,机器人车身角度 θ 还没有增大时,前轮的转矩为最大.这个时刻为临界状态,只要此时满足要求,机器人就可以越过障碍.因此为了求出机器人的最大越障高度,有

$$\theta = 0° \tag{5}$$

由式(1)～式(5)结果和相关的尺寸参数,代入式(6)中,可以求出理论的最大越障高度:

$$h_{\max} = \frac{r}{\cos(120° - 90° - \gamma)} + r \times \sin\gamma \tag{6}$$

通过简化计算,可以粗略估算出极限越障高度约为 1.2 倍的轮式腿半径长.

2.3　越障时重心对机器人倾覆的影响

除了极限越障高度之外,还应尽量避免机器人倾覆的发生,让其顺利的越过障碍物.机器人爬楼梯或是越障的过程中,重心对其攀越能力有很大的影响,如果重心超出通过两轮心纵向直线之间区域时,机器人将发生倾覆现象.O 为机器人重心,h_1 为重心距轮心连线的垂直高度,e 为重心偏离轮心连线垂直中心面的距离.则机器人不发生倾覆的条件为

$$h_1 \times \sin\theta + e \times \cos\theta < \frac{l_2 \times \cos\theta}{2} \tag{7}$$

由此可见 h_1 和 e 的减小与 l_2 的增大,有利于增大

机器人的爬楼梯能力.由图6可知,机器人符合该条件,在越障时不会发生倾覆.

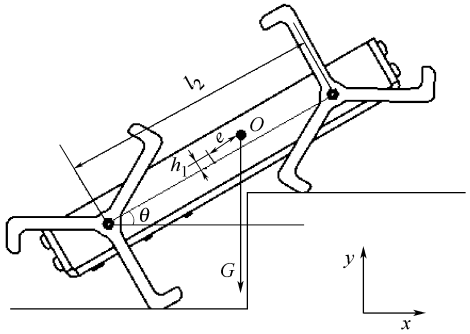

图6 陆行机构的重心对其倾覆影响示意图

2.4 越障时机器人的动力学特性与改进

机器人具有4个彼此相差180°的刚性轮式腿结构,每侧的轮式腿结构可以进行单独的转速和转矩控制.但是这种结构没有很好的弹性,因此在运动中,地面会对机器人产生较大的冲击.特别在越障情况下,冲击会更大,从而对系统的稳定性造成很大的影响.为了解决该问题,打算采用弹性较好的材料加到轮式腿与地面接触的表面上,这类材料可以看成是一个刚度系数很小的弹簧.从动力学角度看,由于机器人足落地时间短暂,几乎是一瞬间,所以在分析地面对机器人轮式腿的作用力时,可用一个单自由度弹簧质量系统来进行描述.这样的结构具有很好的缓冲作用,在一定程度上解决了地面对机器人冲击力的问题,提高了机器人的稳定性.

3 越障运动仿真分析与验证

首先用Solidworks软件绘制了具有轮式腿结构的地面移动机器人三维模型.然后将其导入到ADAMS软件中,对其进行运动稳定性和越障的仿真和验证.建立后的ADAMS模型如图7所示.

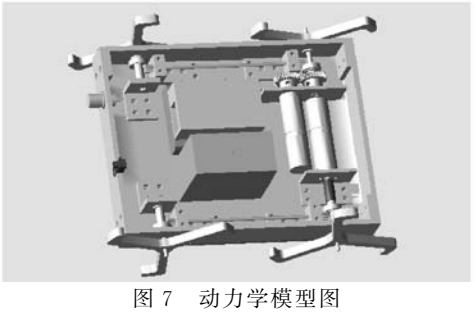

图7 动力学模型图

在建立机器人仿真模型时做如下简化和假设:①机器人各部件均为刚体;②轮式腿与地面有足够大的摩擦,在行走过程中,与地面没有滑动;③忽略关节摩擦.

模型的主参考坐标系的x轴平行于陆行本体方向,正方向为机器人前进的方向,y轴垂直于路面,正方向为垂直向上,如图4所示.z轴垂直于x和y轴所在平面并指向纸面外侧.设置单位为MMKS,重力加速度为$g=9\,806.65\ \mathrm{m/s^2}$,方向为沿$y$轴的负方向.

3.1 重心位移的仿真与分析

首先验证机器人在平面上运动的稳定性.由于采用轮式腿的结构,尽管通过腿形的布局可以提高机器人运动的稳定性,但和一般轮式结构的稳定性还是有一定差距.为了验证轮式腿结构运动的稳定性,故进行仿真和分析.在仿真实验中,不考虑车体的转向,只分析其直线运动,设定两侧轮式腿的驱动电机转速相同.

如图8所示,轮式腿结构在运动过程中的稳定性还是比较理想的.y方向上重心位移的上下波动是要注意的问题,因为这将关系到整个陆行机构的稳定性问题.由图8中可以看出刚开始产生的位移波动很大,随着陆行部分运动起来后重心的位移逐渐趋于稳定,呈现周期性.重心在0.026 0～0.029 0 m的范围内波动,重心发生3 mm左右的位移,基本稳定.

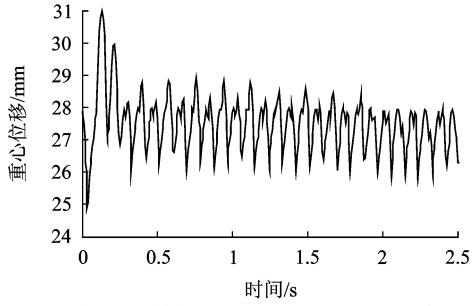

图8 轮式腿结构的重心在y方向上的位移

3.2 机器人越障运动仿真和极限越障高度验证

模型中加入路面障碍模块,设置路面和4个轮式腿的接触为Solid to Solid接触,并定义接触力的各个参数.为了验证越障的最大高度,需要将轮式腿尺寸参数化,因此在仿真中采用半径为40 mm的轮式腿结构.加入的路面模块为垂直障碍,高度依次为40,45,48 mm,坐标系的方向与图9中坐标系的方向一致.考察的目标主要有如下2个:

1)重心的起伏.重心在越障过程中y坐标的变化情况可用来评估该机器人的平顺性和稳定性;实验中获得的数据曲线图表示机器人重心的y坐标变化曲线.

2)对越障最大高度的验证.前面针对越障的

最大高度进行了理论计算.在此要利用软件 ADAMS 对其进行仿真验证,进一步优化结构,完善机构设计.

机器人越障过程如图 9 所示,后面针对不同高度的越障分析都是以此为基础的,下面就针对不同高度的障碍来进行分析.

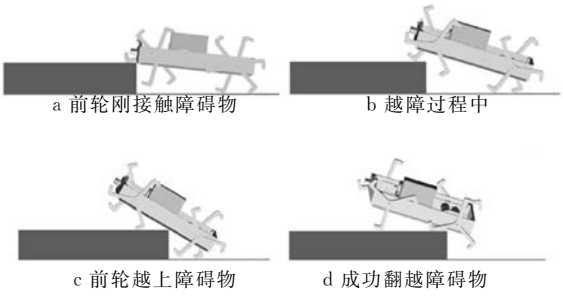

图 9　陆行机构越障过程示意图

针对 40,45,48 mm 的越障高度,分别进行了 ADAMS 的虚拟样机的仿真,验证其越障的高度是否与理论计算的相一致.结合图 10～图 12 进行越障分析,可以看出在越障前陆行部分运动还是比较平稳的,在越过 40 mm 的垂直障碍后运动还是稳定的,可以证明机器人在越障时是比较顺利的.在越过 45 mm 障碍物时重心位移发生的波动较大,说明在越障时已经比较困难,但还是能够越过的.当越障的高度再继续升高时(48 mm),陆行部分就无法越过该障碍物了,如图 12 所示.

在仿真时采用半径为 40 mm 的轮式腿结构,仿真结果表明机器人可以越过的障碍物高度大于

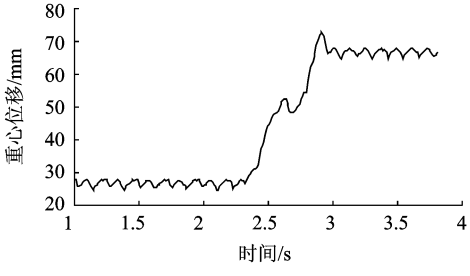

图 10　越障高度为 40 mm 时重心高度变化图

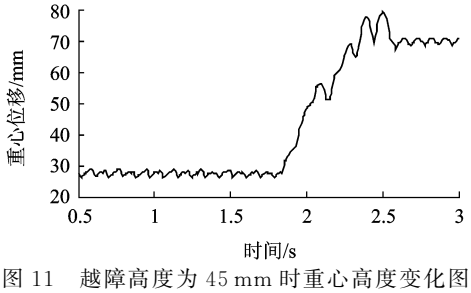

图 11　越障高度为 45 mm 时重心高度变化图

45 mm 但小于 48 mm,其极限越障高度与理论计算的相差不大,验证了极限越障高度的正确性.

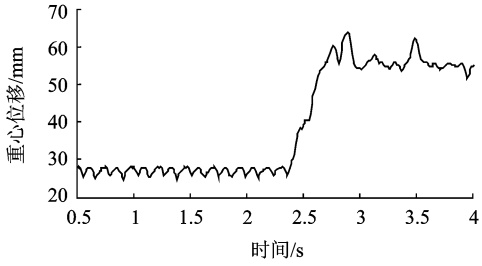

图 12　越障高度为 48 mm 时重心高度变化图

4　结 束 语

轮式腿型越障机器人的行走机构是将轮式和腿式结构有机的结合起来,它具备了两者的优势,陆行机器人的越障能力和地形适应能力大大提了这种新型结构的可行性和高越障性,为陆地移动机器人的创新研究提供了有价值的资料,也为课题的进一步深入打下了基础.

参考文献(References)

[1] Gregory D, Michael J. Computational princip les of mobile robotics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000

[2] Lambrecht B G A, Horchler A D, Quinn R D. A Small insect inspired robot that runs and jumps[C]//Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Barcelona: IEEE, 2005: 1240－1245

[3] Allen T J, Quinn R D, Bachmann R J, et al. Abstracted biological principles applied with reduced actuation improve mobility of legged vehicles[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems. Las Vegas: IEEE, 2003: 1370－1375

[4] 韩广,王田苗,梁建宏,等.一种有效爬楼梯的模块化可重组履带机构[J].机器人,2004,26(5):400－403
Han Guang, Wang Tianmiao, Liang Jianhong, et al. A modularized reconfigurable pedrail structure for effective stair climbing [J]. Robot, 2004, 26(5): 400－403 (in Chinese)

[5] 乔凤斌,谢霄鹏,杨汝清.基于准极限理论的排爆机器人直流电机选择[J].上海交通大学学报,2005,39(6):892－895
Qiao Fengbin, Xie Xiaopeng, Yang Ruqing. The DC motor selection of explosive handling robot based on hypo-limit theory[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2005, 39(6): 892－895 (in Chinese)

(责任编辑:文丽芳)