

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2010.02.012

微小型履带式移动机器人与地面交互特性分析

汤亚锋, 杨庆

(装备指挥技术学院 航天装备系, 北京 101416)

摘要: 为实现对微小型履带式移动机器人的最优控制, 以微小型履带式移动机器人原型为基础, 利用 ADAMS 建立该机器人的模型, 并设置材料属性、关节等, 并根据实际情况施加各种受力, 通过自编子程序模拟路面情况, 对其在不同路面情况下的运动特性进行了仿真分析。仿真结果表明, 该方法能为机器人的结构优化和运动控制提供依据。

关键词: 微小型履带式机器人; 地面; 交互特性; ADAMS

中图分类号: TP242.6 **文献标识码:** A

Analysis of Interaction Characteristics Between Mini-Tracked Mobile Robot and Terrain

TANG Ya-feng, YANG Qing

(Dept. of Space Equipment, Institute of Command & Technology of Equipment, Beijing 101416, China)

Abstract: In order to achieve the optimal control of mini-tracked mobile robot, taking mini-tracked mobile robot plototype as basic, established robot model using ADAMS, and setting material properties, joints and all kinds of possible forces of this robot are added in this environment according to the physical circumstances. Terrain characteristics are applied to the model using subroutines, and then the locomotion characteristics of the mini-tracked mobile robot are achieved after the simulation analysis. The result shows that the method can prove reference for structural optimization and kinetic control of robot.

Keywords: Mini-tracked mobile robot; Terrain; Interaction characteristic; ADAMS

0 引言

地面移动机器人按照形状可分为车形、桶形、仿生形和微型^[1]。车形移动机器人又可分为轮形和履带式两种。履带式机器人的通行能力强, 适合在比较复杂、有突变的地面行走, 经常使用在战场环境、城市反恐、行星表面漫游等任务中。由于机器人体积小且工作在复杂的环境下, 为实现对机器人的最优控制, 须研究其行走工具与地面的相互作用。

对行走工具和地面相互作用的研究最初源于对汽车和坦克等行驶性能的研究。贝克开创了车辆地面力学^[2-3], 提出经典地面力学公式如压力—沉陷理论仍然是目前研究车辆与地面相互作用的基础。而对履带—土壤相互作用特性的研究主要集中在大型装甲车辆上。Anh Tuan Le 等人以挖掘机为研究对象, 研究了履带式车辆的建模和控制的问题, 主要解决了土壤参数的获取和履带车辆的建模问题, 分析了车辆对不同土壤的响应^[4-5]。Ma 和 Perkins 以 M1 主战坦克为例, 详细研究了履带—轮—土壤模型, 并给出了良好的仿真结果, 其仿真模型具有较高的精度^[6-7]。吴大林、马吉胜等利用 MSC.ADAMS 的 ATV 工具箱, 分析了履带车辆地面力学, 验证

了不同路面对车辆性能的影响^[8]。Guo 等人以国内坦克为研究对象, 利用 DADS 分析了履带车辆的动力学特性。实验结果验证了 DADS 提供的履带模型的有效性^[9]。故以微小型履带式移动机器人原型为基础, 利用 ADAMS 建立该机器人模型, 对其在不同路面情况下的运动特性进行分析。

1 系统建模

ADAMS 是集建模、求解、可视化技术于一体的虚拟样机软件, 是目前世界上使用范围最广、最负盛名的机械系统仿真分析软件。考虑到机器人结构比较复杂, 而实体建模并不是 ADAMS 的强项, 故在 Solidworks 里建立实体的三维模型, 然后导入到 ADAMS/View 中, 在 View 中对各个部件设定其材料属性, 施加约束和受力, 完善模型的建立。

1) 履带模型

尽管 ADAMS 中有自带的 ATV 工具箱, 可对履带式车辆方便地进行建模仿真, 但是研究对象为微小型履带式车辆, 其结构特征与大型履带式车辆有较大区别 (如图 1), 不适合采用 ATV 进行建模。故用 ADAMS 提供的基本功能进行建模。

实际的履带是一条闭合的可变形带。如果按照

收稿日期: 2009-09-13; 修回日期: 2009-10-22

作者简介: 汤亚锋 (1982-), 男, 湖南人, 讲师, 国防科技大学硕士毕业, 从事模式识别与智能系统、智能航天器、编队飞行研究。

实物来建模将很困难。对其进行适当简化，把履带处理为具有惯量的刚体块的链式连接^[10]。即如图 2(a) 的单块履带之间通过旋转关节 (Revolute joint) 连接起来，形成图 2(b) 闭合的整条履带。

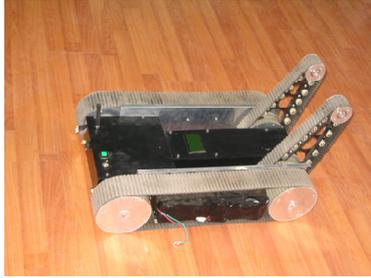
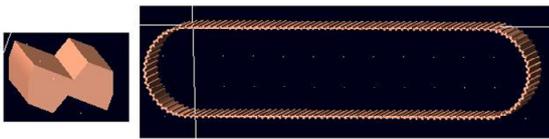


图 1 机器人实物图



(a) 单个履带块 (b) 整条履带

图 2 履带的建立

履带块与履带块间的受力关系可用 Bushing(轴套力) 来模拟^[11]。轴套力提供了一种施加于 2 个构件相互作用力的方法。通过定义力和力矩的 6 个分量 ($F_x, F_y, F_z, T_x, T_y, T_z$) 在两构件之间添加一个柔性力。

施加轴套力时，在 2 个相互作用的构件的力作用点分别建立 2 个坐标轴，首先建立的构件为 I 标记，其次为 J 标记。轴套力计算公式如下：

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_x \\ R_y \\ R_z \\ \theta_x \\ \theta_y \\ \theta_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \\ \dot{\theta}_x \\ \dot{\theta}_y \\ \dot{\theta}_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_{x0} \\ F_{y0} \\ F_{z0} \\ T_{x0} \\ T_{y0} \\ T_{z0} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中， F, T 分别表示力和力矩； $R, \theta, V, \dot{\theta}$ 分别表示 I、J 标记之间的相对位移、转角、速度、角速度； K, C 表示刚性和阻尼系数，下标 x, y, z 分别表示方向；下标 x_0, y_0, z_0 分别表示 x, y, z 方向的初始值。

轴套力系数可以通过表 1 进行计算。

通过合理设置诸多系数，可以建立接近实际情况的履带模型。

2) 履带—轮模型

履带与轮子的沟槽进行啮合，其受力比较复杂，

但可以用 Hertz 接触理论^[12]来近似分析。即：

$$F = K\delta^e + C(\delta)\dot{\delta} \quad (2)$$

式中， F 为法向接触力； K 为 Hertz 接触刚度； C 为阻尼系数，通常随 δ 呈正比变化； δ 为接触点法向穿透距离； e 为描述力形变的指数。对硬弹簧特性， $e > 1.0$ ，对软弹簧特性， $0 < e < 1.0$ 。

通过 Hertz 碰撞理论和使用的材料特性，可以评估出所需要的参数。利用 Impact 函数，可以完成接触力 (contact) 的添加。

表 1 轴套力系数的计算

系数下标	系数意义	方向	计算公式	刚性系数 K	阻尼系数 C
11	拉伸	X	$F = \frac{EA}{L} \delta$	$\frac{EA}{L}$	$0.01 \times K_{11}$
22	剪切	Y	$F = \frac{GA}{2L} \delta$	$\frac{GA}{2L}$	$0.01 \times K_{22}$
33	剪切	Z	$F = \frac{GA}{2L} \delta$	$\frac{GA}{2L}$	$0.01 \times K_{33}$
44	扭转	X	$T = \frac{G\pi R^4}{2L} \times \theta$ $= K_n \times \theta$	$\frac{G\pi R^4}{2L}$	$0.01 \times K_{44}$
55	弯曲	Y	$T = \frac{2EI}{L} \times \gamma$ $= K_\omega \times \gamma$	$\frac{2EI}{L}$	$0.01 \times K_{55}$
66	弯曲	Z	$T = \frac{2EI}{L} \times \gamma$ $= K_\omega \times \gamma$	$\frac{2EI}{L}$	$0.01 \times K_{66}$

3) 履带—地面模型

当车辆在硬地面 (如水泥路面或沥青路面) 运行的时候，可用接触理论来模拟它们间的受力；但是在软土壤 (soft soil) 上运行时，需要用到压力—沉陷理论和剪切应力—剪切位移理论来模拟车辆与地面的相互作用。ADAMS 无法提供受力模式，必须通过 FORTRAN 编写子程序 (Subroutine)，经编译后，将其与 ADAMS 软件连接在一起进行模拟。

2 仿真分析

分别在硬路面和软土壤上进行仿真分析。

2.1 履带车在硬路面上运行

硬路面与履带之间用接触力来模拟受力情况，对不同特性的硬路面，只需改变相应的参数如刚性系数、阻尼系数、摩擦系数等即可。

以典型的水泥路面和沥青路面来分析，设驱动轮所得驱动恒定，小车直线运行。得如图 3~图 6。

从图中曲线可见：小车在水泥路面和在沥青路面得到的响应差别不大，但还有细微的差别。从图

5 可见, 履带在水泥路面受到的法向力比沥青路面要稍大; 从图 6 可以看到, 在沥青路面上, 履带受到的摩擦力比水泥路面要稍大。这符合实际的情况。

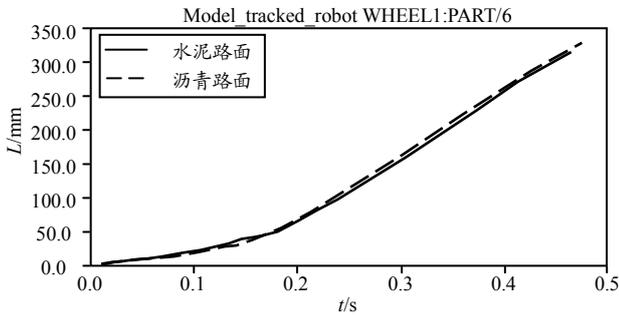


图 3 前轮时间—位移曲线图

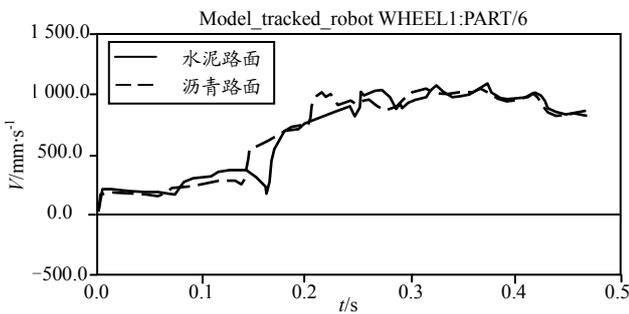


图 4 小车运行速度

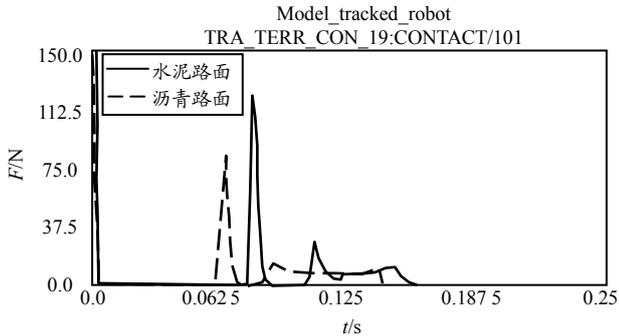


图 5 某块履带受到的法向力

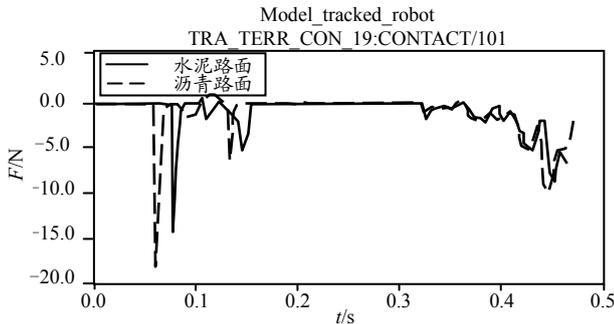


图 6 某块履带受到的摩擦力

2.2 履带小车在软土壤上运行

模拟小车分别在干砂、沙壤土、粘土和重粘土上运行。假设车辆的驱动轮以恒定的角速度转动, 地面水平, 小车做直线运动, 土壤是各向同性、均匀分布的。可得到小车运行的情况如图 7~图 10。

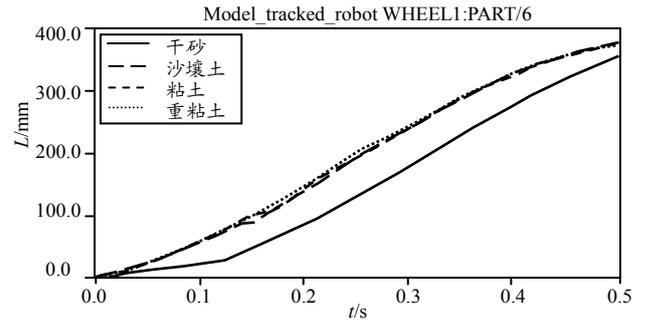


图 7 小车位移—时间曲线图

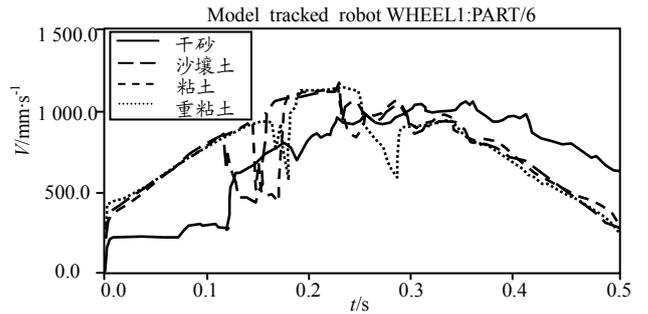


图 8 小车的速度

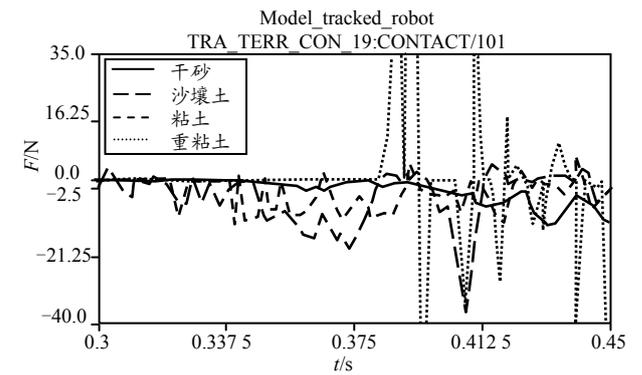


图 9 某块履带的法向力

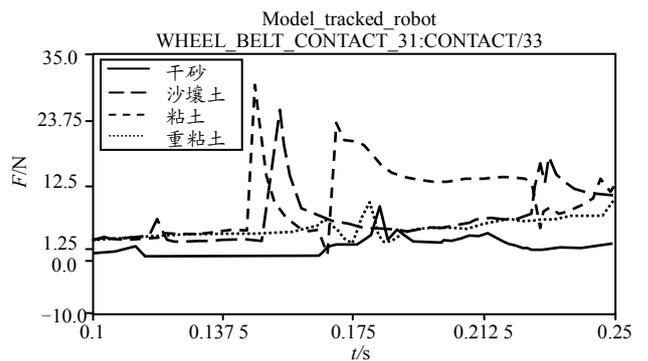


图 10 某块履带与轮子之间的接触力

从上面的图可得到如下结论:

在不同的土壤上, 车辆的响应特性不一样。随着土壤内摩擦角的增大, 车辆的加速度会增大, 可从图 7、图 8 看出位移、速度间的差别。履带的所受的法向力如图 9。法向力的有无代表随着履带的传动其上负载装载和卸载的过程。

(下转第 42 页)

此仅截取了部分顺序跟踪图，如图 8。它显示了在模型逻辑正确性检验过程中，执行活动顺利进

行，没有发生错误、停止或进入死循环的状态，这说明了可视化模型在逻辑结构上是正确和可行的。

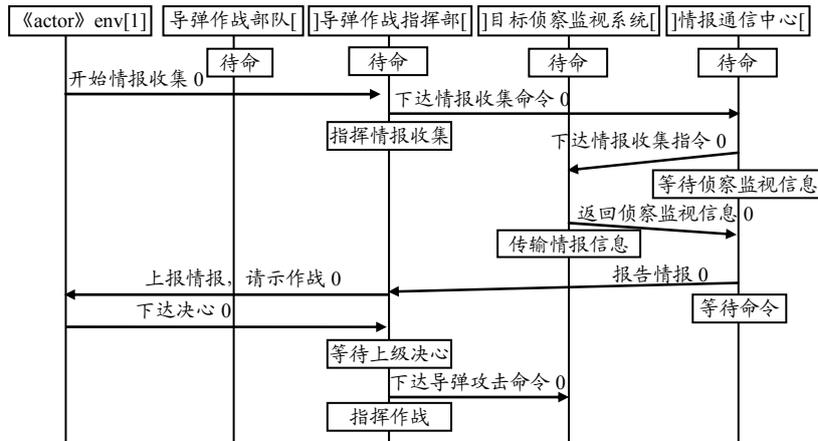


图 8 顺序跟踪图

3 结束语

基于 TAU G2 可视化建模方法的优势在于可建立可视化模型和进行实时模型验证，正是利用这一特点，以上所述实现了地面导弹作战活动可视化建模，达到了直观形象的建模效果。

参考文献:

(上接第 39 页)

而法向力从重粘土、粘土、沙壤土到干砂依次减小。其结果符合压力—沉陷理论，即法向力取决于内聚和摩擦变形模量及沉陷量。图 10 表示某块履带与轮子间的接触力大小。当履带块与轮子接触时，接触力随轮子转动而变化；当履带块与轮子不接触时，其接触力为零。由于履带—轮接触力跟材料特性和绕转速度有关，故土壤对其接触力没有直接的影响。

3 结论

该方法可研究机器人在不同路面情况下的工作特性，为小车的设计改进以及控制研究提供了依据。下一步，将在模型中加入控制律，再进行仿真研究，对比实物的运行特征，对模型修正，使其更真实。

参考文献:

[1] 章小兵, 宋爱国. 地面移动机器人研究现状及发展趋势[J]. 机器人技术与应用, 2005(2): 18-21.

[2] M. G. Bekker. Theory of Land Locomotion[M]. Ann Arbor: University of Michigan Press, 1956.

[3] M. G. Bekker. Introduction to Terrain-Vehicle Systems[M]. Ann Arbor: University of Michigan Press, 1969.

[4] A. T. Le. Modeling and Control of Tracked Vehicles[D]. Sydney: Department of Mechanical and Mechatronic Engineering of the University of Sydney, 1999.

[1] 林端, 等. TAU G2 中文介绍手册[M]. 北京: 中国社会科学出版社, 2002: 4-5.

[2] 林端, 等. Telelogic 产品简介[M]. 北京: 中国社会科学出版社, 2006: 8-9.

[3] 葛信卿. 导弹作战研究[M]. 北京: 解放军出版社, 2005: 67.

[4] 张戈. 信息攻击主要样式的作战流程可视化研究[D]. 北京: 装备指挥技术学院硕士论文, 2008.

[5] A. T. Le, David. C. Rye, and Hugh. F. Durrant-Whyte. Estimation of Track-Soil Interactions for Autonomous Tracked Vehicles[C]//Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics & Automation. Albuquerque, New Mexico: Robotics and Automation, 1997(2): 1388-1393.

[6] C. Scholar, Z. D. Ma, and N. C. Perkins. Modeling of Tracked Vehicles Using a Modal Track Representation: Development and Implementation[C]// Proceedings of SAE Noise and Vibration Conference. Traverse City, Michigan: 1999, SAE Paper No. 99NV-22.

[7] Z. D. Ma and N. C. Perkins. Modeling of Track-wheel-terrain Interaction for Dynamic Simulation of Tracked Vehicle Systems[C]// Proceedings of the 1999 ASME Design Engineering Technical Conferences. Las Vegas, Nevada: 1999, DETC99/VIB-8200, 12.

[8] 吴大林, 马吉胜, 王兴贵. 履带车辆地面力学仿真研究[J]. 计算机仿真, 2004, 21(12): 45-48.

[9] G. Jun, W. Shen-shen, L. Xiao-lei. Dynamic Simulation of Tracked Vehicle Using the DADS Software [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2001, 10(4): 22-24.

[10] A. G. Galaitis. TRAXION: A Model for Predicting Dynamic Track Loads in Military Vehicles[J]. Journal of Vibration, 1984, 106(2): 286-291.

[11] 欧阳宁. 虚拟样机技术在履带式起重机中的应用研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2003.

[12] 金栋平, 胡海岩. 碰撞振动与控制[M]. 北京: 科学出版社, 2005.