

履带机械地面力学建模及牵引性能仿真与试验

宿月文, 朱爱斌, 陈渭, 谢友柏

(西安交通大学现代设计及转子轴承系统教育部重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对现有履带机构仿真模块难以适用于无支重轮式矿用履带车辆的局限性, 通过分析履带-地面交互力学机理, 以每块履带板与地面的力学作用为基元, 根据 Bekker 理论建立了履带沉陷、地面垂直力、牵引力、侧向力、行驶阻力的数学模型, 并基于此模型和 FORTRAN 语言开发了履带-地面交互力学用户子程序. 将该模型结合多体动力学仿真软件 ADAMS 的二次开发技术, 建立了某型矿用履带车辆虚拟样机模型, 并进行了牵引性能动力学仿真分析. 研究表明, 该仿真模型能够对行驶阻力和挂钩牵引力进行分析预测, 误差小于 15%, 在允许范围之内, 可以作为履带机构牵引设计的工具, 且具有更好的普适性.

关键词: 多体动力学; 履带车辆; 地面力学; 仿真

中图分类号: TP391.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)09-0042-04

Detailed Model and Traction Performance Test on Interaction Between Track Link and Ground

SU Yuewen, ZHU Aibin, CHEN Wei, XIE Youbai

(Key Laboratory of Education Ministry for Modern Design and Rotor-Bearing System,
Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A detailed dynamic interaction model of each track link with ground, frame, sprocket and idler is constructed, and a three-dimensional multi-body simulation model for simulating the dynamic behavior of tracked vehicles is developed with ADAMS/Macro and Fortran subroutine. Three-dimensional contact force elements are chosen to describe the interaction of the track links with the vehicle frame, sprocket, and idler. User-defined force elements are used to describe the interaction between each track link and the ground based on Bekker theory. The simulation and real vehicle test of special mining tracked vehicle without road wheels are carried out. The results reveal that errors between simulation and test results are within 15%, and the developed model is able to predict the traction performance of entire vehicle and the dynamic status of each link well.

Keywords: multi-body dynamics; tracked vehicle; terramechanics; simulation

由于履带式机械具有良好的通过性能, 因此在现代军事、农业、建筑业等领域发挥着重要的作用. 履带车辆动力学仿真的关键技术包括多体力学建模、履带-地面力学建模, 特别是后者, 由于土壤与履带的相互作用对履带式机构的牵引附着性能有着重要影响, 因此通过建立合适的履带地面力学模型, 并结合多体动力学可对履带式机械的牵引行驶性能进

行仿真评估, 以实现高效的研究开发.

目前, 国外针对履带车辆的动力学仿真的软件系统主要有 ADAMS/ATV, DADS, RecurDyn, 可提供履带系统主要部件的参数化建模和整个履带系统的组装及动力学仿真等功能^[1-2]. 在实际应用中, 由于这些软件的刚性太强, 灵活性不足, 因此用户只能利用系统所提供的零部件模板建模. 由于上述软

件在履带-负重轮-地面等的相互接触模型及处理方法上对用户都还是“黑匣子”,因此不能描述任意构件在每一时刻的力学状态^[3],而且它们与 CAD、FEM 软件的协作程度很低。

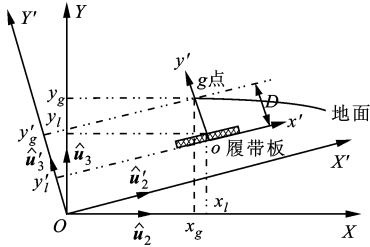
本文根据经典的 Bekker 地面力学理论,采用坐标变换的方法建立了每块履带板和地面的相互运动及力学作用关系。利用带库仑摩擦的三维接触力来描述履带和驱动轮、导向轮以及车身的接触作用,通过 Solidworks 和 ADAMS 软件协同建立了三维多体动力学仿真模型,采用 Fortran 子程序来定义每块履带和地面的力学作用。最后,利用该方法建立了某型履带车辆的行驶仿真模型,通过工程实际现场试验对仿真模型进行了有效性验证。

1 履带和地面交互力学模型

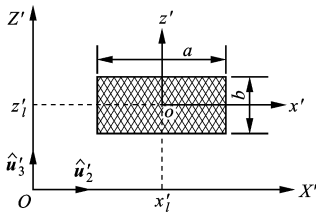
履带地面的力学建模主要包括几何和力学的描述,几何描述主要是建立履带和地面之间的空间位置关系,力学描述则是关于地面和履带的力学建模,即地面对履带的垂直、水平及侧面方向的力学表达^[4],并分别对应地面的支持力、牵引力以及转向阻力。

1.1 地面牵引力建模

如图 1 所示,地面轮廓在整体坐标系 XYZ 中的



(a)前视图



(b)俯视图

a :履带板长度; b :履带板宽度; D :履带板垂直沉陷深度

图 1 履带板-地面沉陷关系图

方程为 $Z=f(X,Y)$,在每个履带板上固连一个局部坐标系 $x'y'z'$, $X'Y'Z'$ 为转换坐标系。令 l 为履带板质心标记,且与 O 点重合,则在每个仿真步, l 在整体坐标系中的坐标为 (x_l, y_l, z_l) ,且都是已知的。

g 点是 y' 与地面轮廓线的交点, x_g, y_g, z_g 是 g

点在坐标系 XYZ 中的位置, x'_g, y'_g, z'_g 是 g 点在坐标系 X', Y', Z' 中的位置。

根据欧拉公式,履带板质心在转换坐标系 $X'Y'Z'$ 中的坐标为

$$\left. \begin{aligned} x'_l &= (x_l \hat{u}_1 + y_l \hat{u}_2 + z_l \hat{u}_3) \hat{u}'_1 \\ y'_l &= (x_l \hat{u}_1 + y_l \hat{u}_2 + z_l \hat{u}_3) \hat{u}'_2 \\ z'_l &= (x_l \hat{u}_1 + y_l \hat{u}_2 + z_l \hat{u}_3) \hat{u}'_3 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: $\hat{u}_1, \hat{u}_2, \hat{u}_3$ 分别是坐标轴 X, Y, Z 的单位矢量; $\hat{u}'_1, \hat{u}'_2, \hat{u}'_3$ 分别是坐标轴 X', Y', Z' 的单位矢量。履带板局部坐标系 Y' 轴与地面廓线的交点为 g 点, g 点与履带板质心 l 的 X' 与 Z' 坐标相同,因此 g 点在坐标系 X', Y', Z' 中的位置可以写为 (x'_l, y'_g, z'_l) ,其中 y'_g 是未知量。通过坐标变换关系得到 g 点在整体坐标系 XYZ 的坐标表达式为

$$\left. \begin{aligned} x_g &= (x'_l \hat{u}'_1 + y'_g \hat{u}'_2 + z'_l \hat{u}'_3) \hat{u}_1 \\ y_g &= (x'_l \hat{u}'_1 + y'_g \hat{u}'_2 + z'_l \hat{u}'_3) \hat{u}_2 \\ z_g &= (x'_l \hat{u}'_1 + y'_g \hat{u}'_2 + z'_l \hat{u}'_3) \hat{u}_3 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

将式(2)代入方程 $Z=f(X,Y)$,得到关于未知量 y'_g 的非线性方程,利用数值方法求解该方程即可得到 y'_g ,则 $D=(y'_g - y'_l)$ 。当履带板和地面接触并陷入地面廓线以下时, D 取正值;当履带板位于地面廓线以上时, D 取负值。

履带板质心在整体坐标系中的速度矢量表示为

$$\mathbf{v}_l = \dot{x}_l \hat{u}_1 + \dot{y}_l \hat{u}_2 + \dot{z}_l \hat{u}_3 \quad (3)$$

$$\dot{D} = -\mathbf{v}_l \hat{u}'_3 \quad (4)$$

履带板质心沿地面的水平剪切位移

$$\delta_x = \int \mathbf{v}_l \hat{u}'_2 dt \quad (5)$$

履带和地面的交互力学模型采用广为认可的 Bekker 地面力学理论^[5],其中接地压力为

$$p = \begin{cases} (k_c/b + k_\varphi) D^n & D > 0 \\ 0 & D \leq 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$F_y = pab$$

式中: k_c, k_φ, n 表示土壤的物理参数。土壤的剪切应力-剪切位移的关系为

$$\tau = (c + p \tan \varphi) (1 - e^{-|\delta_x|/k}) \quad (7)$$

式中: τ 是剪切应力; k 为剪切变形系数; c 表示土壤的黏聚力; φ 为土壤内摩擦角。每条履带的切向牵引力为

$$F_x = ab \int_0^l \tau dx \quad (8)$$

1.2 侧向力和行驶阻力建模

假定土壤特性各方向上相同,土壤对履带的侧

向力可以采取类似切向力的表达,即

$$F_z = ab \int_0^l (c + p \tan \varphi) (1 - e^{-|\delta_z|/k}) dx \quad (9)$$

侧向剪切位移

$$\delta_z = \int v \hat{u}'_1 dt$$

行驶阻力是由履带挤压土壤而产生的变形阻力的水平分量^[6-7],以驱动轮后置为例,为了便于表达,用导向轮中心在车辆沉陷前后的位移差表示土壤的压陷深度,根据力学换算关系将行驶阻力加载于车辆机体的质心处。履带压缩土壤的做功为

$$\begin{aligned} W &= bS \int_0^{D_i} p dD = \\ bS \int_0^{D_i} \left(\frac{k_c}{b} + k_\varphi \right) (\Delta D)^n dD &= \\ \frac{bS}{n+1} \left(\frac{k_c}{b} + k_\varphi \right) D_i^{n+1} \end{aligned} \quad (10)$$

式中: D_i 为第 i 块履带板的压陷深度; S 为履带行驶距离。行驶阻力则可认为是 $R=W/S$, 即

$$R = \frac{b}{n+1} \left(\frac{k_c}{b} + k_\varphi \right) D_i^{n+1} \quad (11)$$

2 履带行驶力学仿真建模

2.1 多体力学建模

考虑到软件 ADAMS 几何建模的功能较差,本文采用软件 Solidworks 进行履带式车辆行走系统的建模,但是如果直接把 Solidworks 中建立的三维模型通过 Parasolid 文件格式导入到软件 ADAMS 中,就会丢失某些关键信息,如轮轴的轴、销轴轴心等,造成软件 ADAMS 中零部件的定位、添加约束和载荷的困难。因此,本文确定的解决方法为:①利用 Solidworks 及其二次开发技术进行履带式车辆行走系统各组成部件的参数化建模,以及整条履带的自动装配,形成完整的几何模型;②通过 Solidworks 与软件 ADAMS 的接口插件 COSMOTION,将上述几何模型转化为软件 ADAMS 可识别的命令文件(cmd),来实现 Solidworks 与软件 ADAMS 的协同建模。这样,既充分利用了 Solidworks 的参数化建模的长处,又可以建立完全符合软件 ADAMS 要求的样机模型(见图2)。

在软件 ADAMS/View 中导入 Solidworks/COSMOTION 生成的命令文件后,即可添加相应的约束和力学模型,以定义其运动及力学关系,从而建立完整的动力学模型。履带式车辆行走系统各部件之间的运动关系为:驱动轮和机架、导向轮和机架,以及履

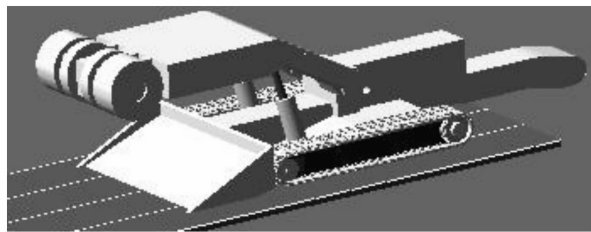
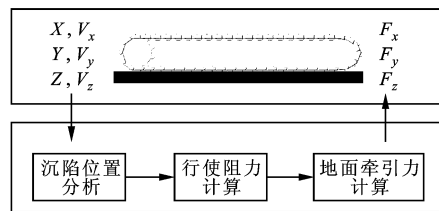


图2 某矿用履带机构模型

带板之间都采用旋转副来定义它们的运动关系,而驱动轮和履带之间采用接触力来实现,导向轮和履带之间的作用力通过冲击函数来模拟。

2.2 履带-地面力学计算程序接口模型

履带和地面的交互力学计算是根据履带-地面力学模型并借鉴文献[8]的处理方法,采用 FORTRAN 语言开发履带和地面的作用力子程序来实现的,如图3所示。建立状态变量,记录每块履带板的质心在 X 、 Y 、 Z 方向上的位移和速度,并在该质心处添加一个三维力 $GForce$,而在 X 、 Y 、 Z 方向上的分量则分别代表切向力、垂直力和侧向力。FORTRAN 语言子程序接收到上述的状态变量后,再根据履带地面交互力学模型计算出每个时刻的切向力、垂直力和侧向力,并反馈到 $GForce$ 。



V_x, V_y, V_z : 表示履带板质心在 X 、 Y 、 Z 方向上的速度

图3 履带地面力学计算原理

3 仿真分析与结果验证

3.1 仿真分析

本文将以一种特殊的履带机构形式,即采矿用的无支重轮的履带机构(该种形式的履带机构无法利用现有的履带机构仿真软件来分析)作为建模对象,以说明所提方法的广泛适用性。这种履带机构的主要结构参数为:整车重 340 kN,履带接地长度为 2.85 m,履带板宽度为 52.4 cm,单条履带系统共有 50 块履带板。本文针对 2 种工况进行仿真分析:①整车在特定路面下空载匀速行驶,此时驱动轮功率全部用于克服整车的内部及外部行驶阻力,即驱动轮功率可反映整车的行驶阻力功率;②人为地在车

体的质心添加逐渐增加的工作负载,直到履带出现明显打滑,此时工作负载即为挂钩牵引力,并以此来评估特定驱动功率下履带机械的对外做功能力。

选取砂土路况,其土壤物理参数见文献[9],整车采用双侧驱动模式,单侧的额定功率为 49 kW,额定转速为 1 080 r/min,额定转矩为 433 N·m,并由软件 ADAMS 生成驱动函数来模拟电机驱动。针对工况①进行仿真,得到的结果如图 4 所示。在空载(不对外做功)情况下,整车启动并加速,然后进入匀速状态,速度基本稳定在 1.2 m/s 左右,而由驱动力矩除以驱动轮半径得到的驱动力则稳定在 22 kN 左右,此刻的驱动力基本可认为是该车辆在此路况下的行驶阻力 F 。针对工况②进行仿真得到的结果如图 5 所示,其中实际速度 V 即为实际行驶速度,理论速度为驱动轮的线速度,二者的差别为履带打滑造成。随着负载的逐渐加大,整车的实际速度逐渐趋于 0,说明履带几乎完全打滑,此时履带的附着能力达到了极限,约在 190 kN 左右。

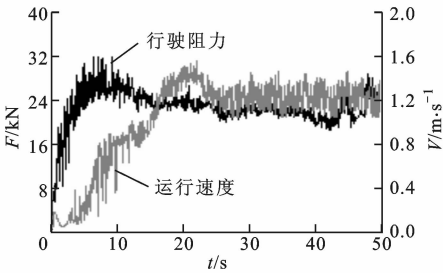


图 4 行驶阻力与车辆速度的仿真曲线

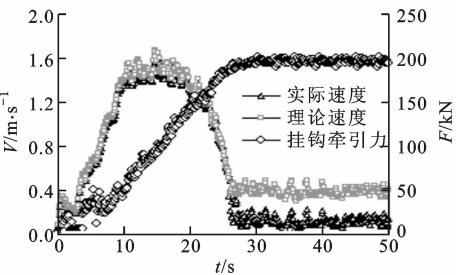


图 5 实际速度、理论速度及挂钩牵引力的仿真结果

3.2 试验验证

针对 2 种工况进行了现场测试,对于第①种工况,在砂土路上空载情况下开动机器并逐步加速,使速度稳定于 1.2 m/s 时,记录电机功率(测试 3 次)。对于第②种工况,测试原理如图 6 所示,准备一辆装载车做加载机构,用应力传感器将该加载机构和履带车辆连接,在启动履带车辆后逐步令加载机构刹车,以加大阻力,直到履带完全打滑。记录应力传感器数值结果(测试 3 次),并作均值化处理。

特别指出的是,在第①种工况下直接测得的结果为电机功率,并由传动效率换算为驱动轮功率,在恒速后近似认为驱动轮匀速转动,因此可将驱动轮功率转化为线驱动力,以便于和仿真结果进行对比。在工况①下的线驱动力 F_d 和在工况②下的传感器应力 F_s 的测试结果见表 1。与图 4 结果相比,在工况①下的 3 个实测值均大于仿真值,相差约 10%~14%,其原因可能在于实际机构中存在诸多摩擦损耗环节,并未能在仿真模型中足够体现,从而导致仿真结果偏低。与图 5 相比,在工况②下的挂钩牵引力的实测值却都小于仿真值,相对实测值的最大偏差为 13%,这可能是因为选用的仿真对象为无支重轮的特殊履带形式,将传统的支重轮与履带的滚动接触替换成履带与机身直接的滑动接触,所以加大了摩擦的影响,使得实际的摩擦阻力大于仿真模型的摩擦阻力。

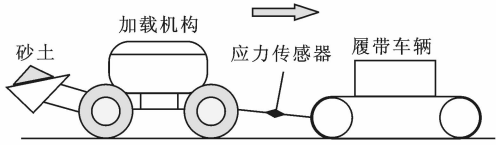


图 6 挂钩牵引力测试原理

表 1 试验测试结果

测试序号	F_d /kN	F_s /kN
1	25.1	168.4
2	24.3	181.2
3	24.6	173.8

4 结 论

本文利用履带-地面交互力学机理及其数学模型,以及 FORTRAN 语言开发出基于软件 ADAMS 的交互力学子程序,并结合 CAE/CAD 协同技术得到了履带式机械动力学建模及行驶仿真的通用性方法。该方法较目前已有的履带机构仿真软件有更强的灵活性和普适性,从而为各种履带式机构的牵引动力学性能的设计提供了有效工具。

通过某型矿用履带式机构的现场实际测试,对本文模型进行了验证,表明在规定工况下的行驶阻力的仿真结果小于实测值,挂钩牵引力则大于实测值,但仿真结果的误差在可承受偏差之内,从而为履带车辆牵引设计提供了依据。但是,由于履带式机构的牵引性能对路面及土壤环境有较强的依赖性,因

此有必要对其他典型路况及土壤下的仿真结果进行进一步的验证.

参考文献:

- [1] 韩宝坤,李晓雷,孙逢春. 履带车辆动力学仿真技术的发展与展望 [J]. 兵工学报,2003,24(2): 246-249.
HAN Baokun, LI Xiaolei, SUN Fengchun. Present state and future outlook of the simulation of tracked vehicles[J]. Acta Armamentarii, 2003, 24(2): 246-249.
- [2] 吴大林,马吉胜,李亚东,等. 一类自行火炮行走部分建模与仿真研究 [J]. 系统仿真学报,2004,6(11): 2552-2554.
WU Dalin, MA Jisheng, LI Yadong, et al. Model and simulation of a self-propelled gun chassis [J]. Journal of System Simulation, 2004,6(11): 2552-2554.
- [3] 吴大林,马吉胜,王兴贵,等. 履带车辆地面力学仿真研究 [J]. 计算机仿真,2004,21(12): 42-44.
WU Dalin, MA Jisheng, WANG Xinggui, et al. Research on track vehicle terramechanics simulation [J]. Computer Simulation,2004,21(12): 42-44.
- [4] Rubinstein D, Hitron R. A detailed multi-body model for dynamic simulation of off-road tracked vehicles [J]. Journal of Terramechanics, 2004,41: 163-173.
- [5] 姚怀新,陈波. 工程机械底盘理论 [M]. 北京: 人民交通出版社,2002: 119-136.
- [6] 韩雪海,刘侃,周玉珑. 履带车辆行驶力学 [M]. 北京: 国防工业出版社,1989: 50-53.
- [7] 唐经世. 工程机械底盘学 [M]. 成都: 西南交通大学出版社,1999: 303-307.
- [8] 戴旭东,赵三星,袁小阳,等. 内燃机系统动力学与油膜动力润滑的耦合分析 [J]. 西安交通大学学报,2003, 37(1): 57-59.
DAI Xudong, ZHAO Sanxing, YUAN Xiaoyang, et al. Study on coupling system dynamical behavior to hydrodynamic lubrication in internal-combustion engine [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2003, 37(1): 57-59.
- [9] WONG J Y. Theory of ground vehicles [M]. 3 ed. Toronto, Canada: John Wiley & Sons Inc. , 2001.

(编辑 管咏梅)