

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.S0.072

# 基于 Vortex 的月球车仿真技术

江磊 郭建娟

(中国北方车辆研究所, 北京 100072)

**【摘要】** 为实现对月球车各种运动工况的性能仿真评估,基于 Pro/E 二次开发技术,将三维地形和车体模型直接生成定制的 SQLite 数据库模型,基于 Vortex 物理引擎相关函数,建立月球车车体动力学模型,并采用 OSG 图形引擎可视化对象;在轮壤台架试验基础上,对 Vortex 内建的轮壤作用模型进行模型的评估及修模,确保模型的正确性;基于 MFC 多文档框架,实现响应中断、事件回调及仿真数据再现等前后处理功能,构建了三维可视化的仿真分析软件。

**关键词:** 月球车 仿真 Vortex 物理引擎 虚拟现实 轮壤模型

**中图分类号:** TP391.9; TP242.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)S0-0352-05

## Simulation Algorithm of Lunar Rover Based on Vortex

Jiang Lei Guo Jianjuan

(China North Vehicle Research Institute, Beijing 100072, China)

### Abstract

In order to achieve the performance of lunar rover simulation assessment in a variety of state of motion, based on programming in the Pro/E modeling environment, 3-D terrain profile and vehicle models were changed to SQLite database directly. Lunar rover dynamic model was set up with Vortex's API functions. And then, visualized objects can be rendered by using OSG graphic engine. The typical terrain mechanical models in Vortex were evaluated and fixed based on wheel soil bench tests. Finally, 3-D visualized software was developed with Microsoft MFC framework, which had function of interrupt, call-back and simulation's datum recurring.

**Key words** Lunar rover, Simulation, Vortex physics engine, Virtual realized, Terrain mechanical model

## 引言

在月球车性能评估领域,建立具有轮壤模型的实时仿真分析环境一直是研究热点。车辆在月球环境中行驶,松软月壤和低重力环境对月球车行驶动力学将产生重大影响。

进行月球车动力学分析与实时仿真,可以得到行走系统与月壤、系统各功能部件之间的动力学特性,为月球车的设计改进、性能评估、操控策略等提供分析数据,从而寻求性能或方案的最优。

迄今为止,这方面的研究工作已有不少,比如 ROAMS<sup>[1]</sup> 仿真系统、RCAST<sup>[2]</sup> 仿真评估环境等。

## 1 基于 Vortex 的月球车建模

Vortex 是加拿大 CM. Lab 公司开发的高性能计算物理引擎,在航空航天、船舶、车辆以及机器人等诸多工程领域得到应用。Vortex 是一种基于多体动力学的通用物理引擎,可将物理世界的机构通过 VxPart 属性(负责描述物体)、VxConstraint(负责描述约束)、VxMaterial(负责描述材质)仿真要素加以描述,通过拓扑关系组装,快速完成机构的多体系统建模,形成虚拟环境下的仿真模型<sup>[3]</sup>。本文以摇臂-悬架式月球车(见图 1)作为研究对象,采用 Vortex 进行月球车动力学仿真分析软件的开发。

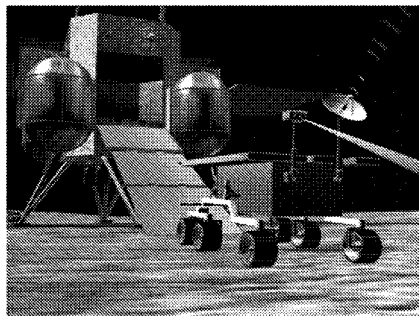


图1 摇臂悬架式月球车

Fig. 1 Rocker-bogie lunar rover

图1表示摇臂悬架式月球车,其行走系统为 $6 \times 6$ 底盘配置方式,左右侧分别安置一对摇臂悬架系统,采用差速器的方式连接;每侧连接3个车轮,且在前后角轮处设置有转向驱动,实现角轮转向。

通过分析月球车多体系统的组成,分别建立本体(VxPart)、约束(VxConstraint)、材质(VxMaterial)对象模型,确定其建模拓扑结构如图2所示。

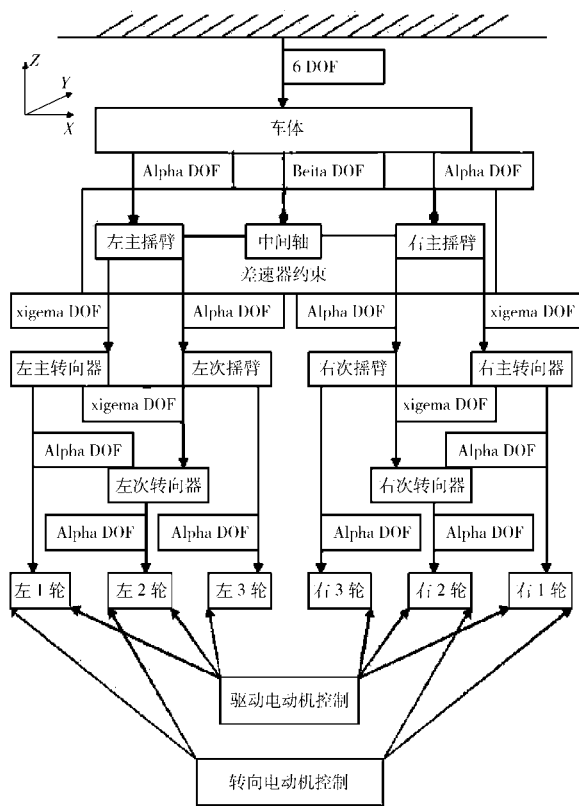


图2 月球车拓扑关系图

Fig. 2 Topology map of lunar rover

VxPart 属性方面:月球车行驶缓慢,且无弹性悬架等柔性部件,因此在本体属性中,无需考虑柔性环节,将车轮、悬架等结构件视为刚体进行解算。

VxConstraint 属性方面:月球车采用3种类型的约束方式:铰接副(VxHinge),即两物体绕着指定轴旋转的连接方式,典型的有主摇臂与副摇臂之间的铰接副,主摇臂与转向架之间的铰接副等;差速器副

(VxGear),即两侧输入量是中间轴输入量的2倍,差速器物理上是由3个锥齿轮配对形成的复杂约束关系,在Vortex中,可采用带相对约束关系的VxGear约束副来实现;轮地约束,即车轮与月壤接触所产生的非完整约束,与普通刚体碰撞接触不同,轮壤接触具有沉陷量大、可打滑等特殊力学现象,为此,Vortex中,采用碰撞描述的方式,在VxSoftTerrainTireModel函数基础上,联合材质VxMaterial模块,车辆VxVehicle模块,用于轮壤模型的求解与计算。

VxMaterial 属性方面:Vortex在材质方面管理比较特殊,材质作为物理碰撞检测所必需的部分,不单独作为VxPart的子属性,而采用全局材质来管理碰撞对。在月球车仿真中,需设置刚体碰撞和轮壤碰撞两种不同形式的材质。

## 2 软件架构及关键技术实现

### 2.1 软件总体架构

月球车动力学仿真软件总体架构如图3所示。

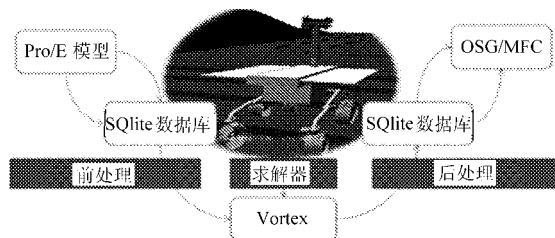


图3 月球车动力学仿真软件架构

Fig. 3 Simulation framework of lunar rover dynamics

软件开发主体环境为VC++9.0,物理引擎为Vortex,图形引擎为OSG。通过二次开发技术,实现软件三维模型与Pro/E软件的集成,其模型的存储与信息传递采用SQLite数据库。

### 2.2 软件开发的关键技术

#### 2.2.1 Pro/E 二次开发

虚拟现实的核心思想是三维场景可视化实现,因此准确的几何外观对于运动性能的直观表达具有非常重要的作用。在本软件中,月球车本体的三维模型,以及自定义的月球模型都通过Pro/E环境建模实现,即实现工程文件的快速转化,保证三维场景的逼真性。

为此,Pro/E二次开发分为两部分内容:车辆模型准备模块和DEM地形生成模块。

车辆模型准备模块实现了对活动部件进行质量属性设置,对活动部件进行物理模型定义,重用存在的部件,装配巡视器模型,定义巡视器模型的约束关系,定义巡视器模型的约束限制,输出约定格式的SQLite数据库文件等功能。

图4是在Pro/E中实现对月球车本体进行物理模型设置、约束信息设置和装配信息提取的软件截图。

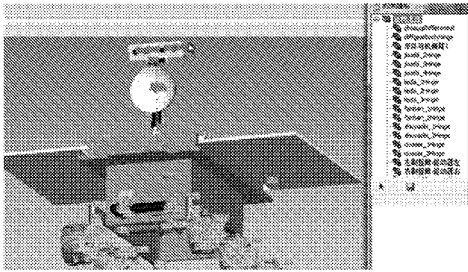


图4 月球车本体模型的Pro/E操作截图

Fig.4 Lunarover model in Pro/E

DEM地形生成模块实现了典型地貌的模型三维创建,典型地貌的注册和参考定义,典型地貌变换驱动定义,在整体地形中布置典型地貌,在整体地形中已布置典型地貌的变换,目标地形区域的DEM信息提取,目标DEM地形文件的生成,见图5。

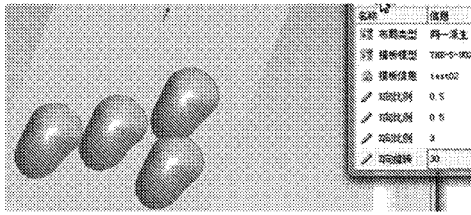


图5 DEM地形生成模块

Fig.5 DEM modeling module

### 2.2.2 MFC可视化框架开发

采用Vortex开发月球车动力学软件,在编程技术方面存在两方面的难点:

**显示问题:**Vortex进行仿真时仅支持命令行方式启动,这种方式无法应用到实际项目中,如何把仿真窗口嵌入到标准的Windows视图窗口中就成了难题,其核心在于Vortex与MFC视图框架的集成问题。

**操控问题:**Vortex仿真操控支持两种方式,即键盘操控方式与游戏操纵杆控制形式。本项目中要求实现主控平台远程发送控制指令及用户通过交互式界面使用鼠标、键盘操作来实现控制,这给开发带来困难。

对于窗口显示集成的问题,由于Vortex依托于OSG来实现场景渲染,而OSG与MFC的窗口机制有比较成熟的技术,因此采用以下步骤来实现Vortex与MFC窗口显示的集成:

(1)构建一个标准的OSG场景渲染引擎集成到MFC窗口中,实现可以自由打开OSG的各种场景模型,这样由三维Pro/E模型转化过来的STL刚体模型就能够加入到场景中进行装配,模型装配后形成

OSG的标准结点进行显示。

(2)拆分Vortex的处理流程:首先去除Vortex的显示功能,模型的装配、运动、碰撞解算与仿真操控完全放到后台处理,这样Vortex在后台就可以成功进行仿真与解算。然后,把每帧仿真的结果提取出来,用于OSG渲染,从而实现与图形节点相对等的物理模型。

对于界面操控指令集成的问题,标准Vortex对仿真的实时操控以及OSG场景渲染引擎都是通过键盘控制类与游戏杆控制类来实现的。要实现可以通过交互式及主控平台方式指令式操控,必须实现一个专用的操控机制。

在集成时,把主控平台指令和用户输入指令进行分解,具象为操作对象与状态量。通过索引库查找,定位到Vortex中的物理对象,再直接对其进行状态信息的设置。最后再通过OSG来更新对象的显示状态。操控指令集成的另一方面就是把Vortex仿真的具体对象与状态量反射到交互式显示界面中,这是一个反方向的操作过程,可以通过标准的Windows消息机制与OSG回调机制来实现。

### 2.2.3 月球车轮壤模型的自定义加载

轮壤作用模型被封装在VxVehicle车辆模块库中,提供对常规车辆轮胎模型的仿真。所谓常规车辆,是指拥有固定轴数的车辆或双履带配置的车辆。摇臂悬架式月球车尽管为6轮车辆配置,但与普通车辆在悬架结构上有明显的差异,因此采用Vortex无法满足轮壤模块激活条件。为此,需要通过轮胎模块、轮壤模块、材质模型、碰撞检测、回调机制的底层API函数,重新构造轮壤作用计算环境,使解算器能够有效识别,从而做出正确的计算。上述过程可以通过4个步骤实施:

(1)创建VxVehicle\VxWheelUnit轮胎单元,用于接收自定义轮胎模块,每个车轮均对应一个VxWheelUnit单元。

(2)创建VxWheelComponent模块,用于接收轮胎的几何外形、质量与惯量、输出轴方向等轮胎实体信息。并将之与轮胎单元连接:

```
VxWheelComponent * wheelComponent
```

```
= wheelUnit -> addWheelComponent(...);
```

(3)创建Vx基类的轮壤模块描述器VxWheelTireModelSubscriber,将前面创建的wheelUnit单元与轮壤模型进行手动挂载:

```
Vx::VxWheelTireModelSubscriber
```

```
* gTireModelSub =
```

```
new VxWheelTireModelSubscriber(...);
```

```
pU -> addIntersectSubscriber(... ,
```

```

kEventFirst, gTireModelSub, 0);
pU -> addIntersectSubscriber(...,
kEventActive, gTireModelSub, 0);

```

在步骤(1)、(2)中,创建的车轮单元 VxWheelUnit 和部件 VxWheelComponent 的父类都是 VxVehicle,对于月球车等非常规车辆,其轮壤模型是不起作用的。在步骤(3)中,创建基类为 Vx 的描述器,并通过该描述器将车轮模型描述在 Vx 底层 API 级别,以供求解器调用。

(4)在每个计算循环周期,强制将描述器灌入求解器中,从而实现轮壤模型的绑定。

```

while(! viewer -> done())
{
    gTireModelSub -> preStep();
    viewer -> frame();
    gTireModelSub -> postStep();
}

```

通过上述 4 个步骤,可实现月球车摇臂悬架底盘形式的轮壤模型。

### 3 轮壤模型仿真与试验

月球车动力学仿真软件中,轮壤作用模型是研发的一个关键要素。目前轮壤动力学模型应用最广泛的是 Bekker<sup>[4]</sup>或 Wong<sup>[5]</sup>的模型理论。在 Vortex 中,提供了对上述模型的支持。

#### 3.1 Vortex 轮壤模型

在 Vortex 5.0 之前,Vortex 只提供一种 Bekker 轮壤作用模型,它由剪切应力和正应力两部分组成,其中剪切应力模型为

$$\tau(\theta) = (c + \sigma(\theta) \tan\phi) (1 - e^{-j/K}) \quad (1)$$

式中  $\sigma$ ——正应力  $\phi$ ——内摩擦角  
 $j$ ——剪切位移  $K$ ——剪切模量  
 $c$ ——内聚力

正应力模型采用 Bekker 模型

$$p = \left( \frac{k_c}{b} + k_\phi \right) z^n \quad (2)$$

式中  $k_c, k_\phi, n$ ——土壤模数

由于项目进展需要,作者与 Cm. lab 公司合作,在 Vortex 5.0.1 版本中增加了两种新的轮壤作用模型,分别称为 BekkerWong 模型和 Reece 模型。

BekkerWong 模型<sup>[5]</sup>

$$W = rb \left[ \int_{\theta_r}^{\theta_f} (\sigma(\theta) \cos\theta + \tau(\theta) \sin\theta) d\theta \right] \quad (3)$$

$$D = rb \left[ \int_{\theta_r}^{\theta_f} (\tau(\theta) \cos\theta - \sigma(\theta) \sin\theta) d\theta \right] \quad (4)$$

$$T = r^2 b \left( \int_{\theta_r}^{\theta_f} \tau(\theta) d\theta \right) \quad (5)$$

式中  $W$ ——轮轴上的载荷  
 $D$ ——作用在轮轴上的力  
 $T$ ——作用在轮轴上的力矩  
 $\theta_f, \theta_r$ ——接近角和离去角  
 $r$ ——轮半径  $b$ ——轮宽

Reece 模型的正应力模型与 BekkerWong 模型不同,其公式为<sup>[6]</sup>

$$p = (ck'_c + \rho bk'_\phi) \left( \frac{z}{b} \right)^n \quad (6)$$

式中  $\rho$ ——土壤容重

$k'_c, k'_\phi$ ——Reece 土壤模数,无量纲,与土壤模数  $k_c, k_\phi$  不同

#### 3.2 轮壤模型的仿真评估

为了对 Vortex 轮壤作用模型进行仿真分析评估,按照单轮土槽牵引性能测试台架,建立如图 6 所示的单轮台架测试仿真场景。

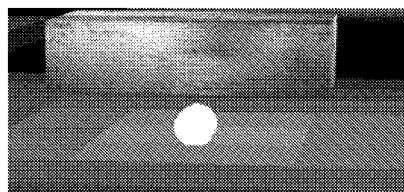


图 6 单轮台架测试仿真场景

Fig. 6 Simulation snapshot of single wheel test

将测试车速度固定,改变不同轮速,从而获取不同滑转率下的挂钩牵引力系数。同时,在 Matlab 中对式(3)~(5)进行编程,计算不同滑转率下的牵引性能。

在 3 kg, 5 kg, 7 kg, 20 kg 的情况下,对 Vortex 和 Matlab 计算结果进行对比。图 7 表明,Vortex 计算结果与 Matlab 计算结果趋势一致。

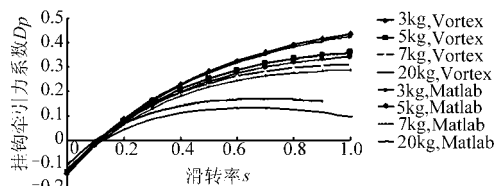


图 7 Vortex 和 Matlab 程序计算结果对比

Fig. 7 Results comparison of Vortex and Matlab

#### 3.3 轮壤台架试验及模型修正

为了对 Vortex 轮壤模型进一步评估和修正,开展了轮壤台架试验,试验系统见图 8。

在该台架上,针对本文要求,设计并开展了具体试验,试验结果与仿真模型对比结果见图 9。

通过试验结果验证,由式(6)所定义的 Reece 模型符合试验结果趋势,通过沉陷量的修模可以达到理想的效果。

程序运行主界面为标准 Windows 应用程序样

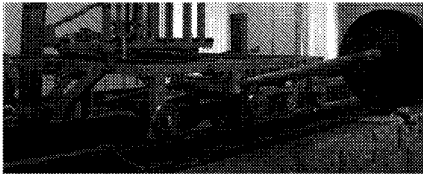


图8 NFS 轮壤台架外观图

Fig. 8 Test bin of NFS single wheel

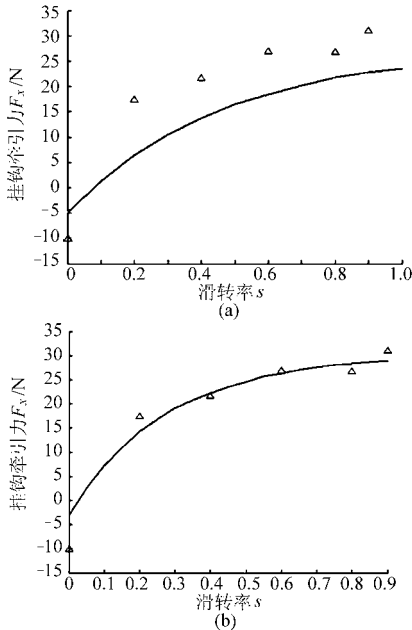


图9 挂钩牵引力-滑转率曲线

Fig. 9 Drawbar pull vs slip

(a) BekkerWong 模型计算值与试验值

(b) Reece 模型计算值与试验值

式,采用菜单与工具栏的形式,为主要操作形式,采用可停靠的工具条及键盘来进行部分交互信息的处理,界面如图10所示。

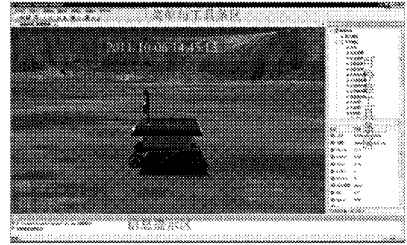


图10 月球车动力学仿真软件界面截图

Fig. 10 ATRDS snapshot

目前已具备如下功能:仿真数据库的存储/读取;通过 SQLite 数据库,与 Pro/E 建模功能相连接;场景建立及初始位置变换;仿真分析;结果存储与处理。

下一步将开展验证试验,对软件的仿真置信度开展评估,调整模型,并完善软件的不足之处,增加错误响应及处理机制等。

#### 4 结束语

基于 C++ 编程语言,采用 Vortex 实时物理引擎、OSG 图形渲染引擎、Pro/E 三维建模工具,构建了三维可视化的月球车仿真分析软件。首先,提供了一个多体动力学实时仿真环境,并融合多种轮壤作用模型,可对月球车在软土路面上的动力学行为进行全三维分析;其次,由于采用 C++ 标准化语言,具有极强的可扩展性,可根据分析或任务需要,增加相应功能模块,定制所需特殊功能,对于搭建多学科融合大仿真系统,具有优势;再次,该软件基于工程级别的虚拟现实软件开发,不仅具有高精度的计算,而且具有良好的场景渲染。

#### 参 考 文 献

- 1 Jeng Yen, Abhinandan Jain, J. Balaram. ROAMS: rover analysis, modeling and simulation [C]. Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space, Proceedings of the Fifth International Symposium, ISAIRAS 99, 1999.
- 2 Robert Bauer, Winnie Leung, Tim Barfoot. Development of a dynamic simulation tool for the exomars rover [C]. The 8th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space- iSAIRAS, 2005.
- 3 CM. Labcompany. Vortex help documentary 5.0.2 [M]. Canda, 2011.
- 4 Bekker M G. 地面-车辆系统导论 [M]. 《地面-车辆系统导论》翻译组. 北京: 机械工业出版社, 1978.
- 5 Wong J Y, Reece A R. Prediction of rigid wheel performance based on analysis of soil-wheel, stresses, part I: performance of driven rigid wheels [J]. Journal of Terramechanics, 1967, 4(1): 81~98.
- 6 Genya Ishigami. Terramechanics-based analysis and control for lunar/planetary exploration robots [D]. Sendai: Tohoku University, 2008.