

8-13-2020

Design of Virtual Prototype for Lunar Rover in Training Simulation System for Teleoperation

Miao Yi

Beijing Aerospace Control Center, Beijing 100094, China;

Ti Zhou

Beijing Aerospace Control Center, Beijing 100094, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Design of Virtual Prototype for Lunar Rover in Training Simulation System for Teleoperation

Abstract

Abstract: To implement the requirements of training and simulation for the teleoperation of lunar rover, the methods of modeling lunar rover is studied in the simulation of virtual prototype on ADAMS, a framework was proposed for the simulation system of lunar rover, the 3D-ontology model of virtual prototype was given, the relative relations were analyzed among parts, and relatively fixed parts were partitioned by combining. The constraints relations were modeled by kinematics pair, and the dynamics moment in the motions were added for the relative moving of parts. A series of experiments were designed to validate that the simulation of telemetering parameters was affected by the activity mechanism, such as solar arrays, in the move and exploration progresses of lunar rover. The results of experiments show that the virtual prototype of lunar rover can simulate the kinematics characteristic of its movement and exploration, and give the vivid data for teleoperation training.

Keywords

lunar rover, ontology model, constraint relative, training simulation, ADAMS

Recommended Citation

Miao Yi, Zhou Ti. Design of Virtual Prototype for Lunar Rover in Training Simulation System for Teleoperation[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(11): 2701-2708.

遥操作训练仿真系统的月球车虚拟样机设计

苗毅, 周侗

(北京航天飞行控制中心, 北京 100094)

摘要: 为适应遥操作训练仿真的需要, 研究了基于 ADAMS 的月球车虚拟样机仿真建模方法, 提出了月球车仿真系统框架, 建立了月球车本体三维模型, 分析了各部件之间的相对运动关系, 并对相对固定的部件进行了组合划分, 为存在相对运动的部件采用运动副建立了约束关系模型, 并采用驱动的方式为各部件的相对运动添加动力力矩。设计了一系列的实验验证太阳翼等活动机构对月球车运动过程中遥测参数仿真的影响。实验结果表明, 提出的月球车虚拟样机模型实现了符合机械运动学特征的月面行走与探测仿真, 为遥操作训练提供了逼真的训练数据。

关键词: 月球车; 本体模型; 约束关系; 训练仿真; ADAMS

中图分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2016) 11-2701-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201611008

Design of Virtual Prototype for Lunar Rover in Training Simulation System for Teleoperation

Miao Yi, Zhou Ti

(Beijing Aerospace Control Center, Beijing 100094, China)

Abstract: To implement the requirements of training and simulation for the teleoperation of lunar rover, the methods of modeling lunar rover is studied in the simulation of virtual prototype on ADAMS, a framework was proposed for the simulation system of lunar rover, the 3D-ontology model of virtual prototype was given, the relative relations were analyzed among parts, and relatively fixed parts were partitioned by combining. The constraints relations were modeled by kinematics pair, and the dynamics moment in the motions were added for the relative moving of parts. A series of experiments were designed to validate that the simulation of telemetering parameters was affected by the activity mechanism, such as solar arrays, in the move and exploration progresses of lunar rover. The results of experiments show that the virtual prototype of lunar rover can simulate the kinematics characteristic of its movement and exploration, and give the vivid data for teleoperation training.

Keywords: lunar rover; ontology model; constraint relative; training simulation; ADAMS

引言

随着我国深空探测工程的不断向前发展, 我国的航天工程已经进入地外天体探测的遥操作时代。2013 年我国的月球车首次登陆月球并对其进行科

学考察, 实现了地外天体遥操作控制。为了圆满完成遥操作控制任务, 深空探测遥操作中心需要建立探月工程任务训练仿真系统, 其目的是满足探月二期月球车遥操作人员的训练要求, 提高任务操作人员对月面环境下遥操作的熟练程度、提高任务指挥人员的分析、决策与处理能力。因此, 该仿真系统需要构造一个逼真的月球车仿真模型, 并且该模型应该能够准确反映机械动力学特性, 将局部的力学变化反映到整车模型上, 使遥操作人员能够提前熟悉月球车遥操作控制流程。



收稿日期: 2015-04-08 修回日期: 2015-06-17;
作者简介: 苗毅(1976-), 男, 陕西神木, 硕士, 高工, 研究方向为航天测控软件设计与系统仿真; 周侗(1981-), 男, 湖南岳阳, 博士, 工程师, 研究方向为软件工程与系统仿真。

<http://www.china-simulation.com>

• 2701 •

为了快速构建该模型, 本文采用基于 ADAMS 的虚拟样机开发方法^[1-6], 建立月球车的三维本体模型、约束关系模型和驱动力模型, 完成了月球车多体动力学建模。

1 月球车虚拟样机设计

月球车是一个六轮悬臂结构车体, 与以往类圆柱状的空间飞行器显著不同在于其姿态与运动学过程仿真。空间飞行器的姿态和运动坐标仅受天体引力和自主调姿的影响, 因此以往飞控过程仿真是完全被动控制仿真, 仿真姿态调整完全按照注入要求进行调整, 调整后的结果与调整要求基本一致。而月球车在月面运动过程中需根据月面突起与陷落状态适时调整悬臂, 使车体保持平衡状态。该巡视过程要求月球车仿真模型需要实时与月面地形系统交互, 根据各关节的力学约束完成位置姿态的调整并反映在遥测参数中。月球车仿真需综合考虑车体结构的变化、月面起伏对车体位置姿态的影响等, 实现一个逼真的、可重复的遥操作演练环境。

由于月球车各结构之间以及车体与月面交互的相互作用模型非常复杂, 计算过程繁琐, 为了使仿真过程更加逼真、仿真数据更加准确, 需要使用成熟的运动学建模软件加快仿真演练环境的搭建。本文采用 Adams2013 为建模与仿真平台, 进行月球车虚拟样机设计。月球车虚拟样机整体设计分为五大模块, 即: 本体结构模块、运动约束模块、动力系统模块、遥测数据模块和应用仿真模块, 图 1 给出了基于 ADAMS 的月球车虚拟样机模块之间的设计图。本体结构模块主要完成虚拟样机的外形构造、质量和转动惯量定义, 实现基本的月球车本体模型。该部分是虚拟样机的基础, 本体结构定义的准确性将影响力与运动状态, 同时也影响测量量的准确性。因此本体结构模块可以通过专业设计软件进行本体结构设计, 然后导入 ADAMS 中实现本体的精准化。运动约束模块主要完成各结构部件之间的相对运动关系定义, 限制各类运动的自由度, 以约束的方式将车上各活动结构连接成一个整体。该模块使用的输入是本体结构模块定义的各类

零部件, 通过定义其上的参考点之间的相对关系完成约束的建模。其难点在于悬架机构的约束关系构造, 使得在重力作用下月球车能够在悬架机构模型作用下自行调整大小摇臂的夹角, 达到在地面站立的目标。动力系统模块主要设计了各约束关系之上的驱动力的定义, 为月球车科学探测和月面巡视提供动力。本模块的输入是运动约束模块提供的各类约束关系, 根据实际运动情况定义约束上的力的大小和方向。该模块的重点是月面与车轮之间的支持力、形变和摩擦力的设计。应用仿真模块针对月面工作过程, 以在各仿真步调整动力系统模块中驱动力的大小的方式, 建立月球车行走过程模型和科学探测模型。本模块建模的输入是动力系统中定义的驱动力、支持力等, 根据仿真过程的推移, 按照遥操作方案要求变换力的大小和方向, 使月球车的运动过程符合实际需求。遥测数据模块在本体结构基础之上, 建立遥操作关心的车体位置、姿态和各活动机构的展开角等运动状态测量模型, 在应用仿真模块的模型驱动下实时计算符合当前月面起伏状态的遥测数据变化情况, 从而输出整个仿真过程的参数变化结果。

图中的本体结构模块、运动约束模块和动力系统模块是月球车虚拟样机的核心部分, 是月球车行走和探测的基础, 构成了虚拟样机的基本模型, 因此本文将着重研究这 3 个模块的建模方法。本体结构模块在 ADAMS 中通过部件及其相对位置定义, 该模块共定义了 34 个部件(不含大地 ground), 为运动约束模块提供输入。运动约束模块以部件之间的旋转、耦合等约束关系定义, 共计 23 个转动副, 1 个平移约束(机械臂的伸缩端), 9 个固定约束, 2 个耦合副。该模块定义的约束关系为动力系统模块提供输入, 使动力系统模块的驱动力能在约束上定义。运动约束模型为虚拟样机在仿真时保持各部件的活动状态提供了支持, 实现了车体符合机械运动特性的仿真。动力系统模块以约束上的驱动力和部件之间的接触力定义, 共定义了 14 个约束上的驱动和 6 个轮地接触力, 实现了月球车的科学探测和行走过程。

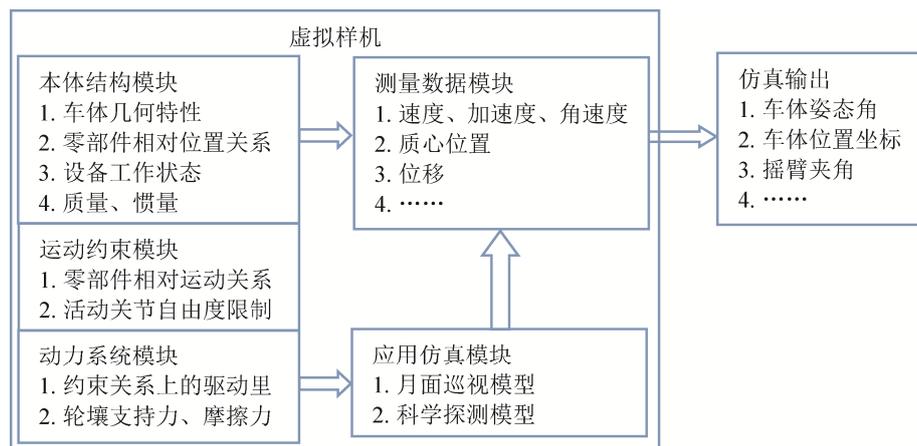


图 1 月球车虚拟样机系统设计图

2 虚拟样机模型构建

本节描述了虚拟样机模型的构建方法, 主要包含图 1 的本体结构模块、运动约束模块和动力系统模块三部分内容, 实现了月球车的本体模型的建立。本体结构主要包括月球车的车身、天线、左右太阳翼、桅杆、云台、各类相机、机械臂、悬架结构、车轮及转向机构等部分, 并对各部件设定其等效质量和运动惯量。月球车在月面工作过程中太阳翼会根据阳光入射角进行展开角度调整, 其展开角度不同, 将影响整个月球车等效质心的位置, 因此太阳翼与车体之间需要建立可旋转的运动约束, 在车体运动过程中由 ADAMS 实时计算等效质心并将展开角反映在车的运动参数上。相机拍照需要在当前车体姿态下转动桅杆、使云台有俯仰活动, 从而使相机镜头对准科学探测所关心的方位拍照。桅杆上的定向天线的指向也需在当前车体姿态下由桅杆的展开角和转动角确定其方位, 使得地面测控站落入定向天线的波瓣范围。因此需要对桅杆的展开角、转向角和云台的俯仰角进行建模, 实现相机和定向天线指向的模型。车的行进过程需要根据月面的起伏情况实时调整悬架机构, 使得车体保持平稳状态, 同时还应能够根据行走的目标和方式实时调整车轮方向并驱动车轮转动, 因此需要对悬架机构进行建模, 使月球车能够根据月面突起与坑洼的实际状态和车的等效质心位置实时调整差动机构, 完成车体的平衡稳定。月球车在月面进行科学考察

时, 机械臂探头位置和指向非常重要, 而探头的位置方向与机械臂各个关节旋转角度关系密切, 通过在 ADAMS 中建立机械臂的偏航、展开和腕关节俯仰的约束模型, 将各关节有机关联在一起, 实现探头位姿与各关节角度的对应关系。有些约束关系仅约束了两个部件之间的相对运动, 月球车动力系统不会主动改变部件之间的相对位置, 比如主副摇臂之间的转动约束是根据月球车行进过程而动态调整的; 有些约束关系上的两个部件的相对位置也会被月球车主动改变, 如车轮转向、太阳翼展开等。因此需要在这部分约束之上设置电机驱动, 使得虚拟样机能够根据仿真要求使约束关联的两个部件产生相对运动。

太阳翼、桅杆和机械臂等的展开、偏航等角度不同会对月球车行进过程产生影响。这些影响不断累积会造成车的实际运动轨迹偏离任务规划方案。为了准确的模拟这种偏移误差, 需要为这些活动机构和运动机构准确建立其三维本体模型, 并正确建立各部件之间的约束关系, 实现其相互干涉。

虽然 ADAMS 提供了创建几何模型的部件库, 但是月球车构造复杂, 很多零部件结构由众多复杂实体组成, 因此难以在 ADAMS 中直接建立与实际月球车几何外形一致的三维本体模型。为了确保三维模型的准确性, 本文利用 ADAMS 与三维实体建模 CAD 软件(如 Pro/E、UG 等)的接口, 将 CAD 软件中建立的三维零部件模型导入至 ADAMS 中。

同时, 根据月球车总体设计方案定义各部件形状、质量、惯量以及部件之间的约束关系, 根据各部件的运动关系, 以运动过程中相对位置不变的部件划分在同一大部分件中, 再根据各部件可能的运动情况设计导致运动所需的驱动和力, 最后根据具体的仿真要求, 建立相关状态的计算模型。

2.1 月球车三维模型构建

为了能尽可能详细地构造月球车的三维模型, 本文首先在 Pro/E 中构造了月球车的三维模型。在 Pro/E 中将模型零件离散后导入到 ADAMS 中, 将没有相对运动关系的零件构建成一个个构件。例如, 将车轮的轮轴、轮毂及其上的网、片等零件绑定为一个构件。通过将零件进行划分组合, 使上千个零件数降低为 28 个与月球车巡视探测相关的大部件, 大大降低了约束和自由度的数量, 使得模型更加简洁, 仿真效率更高。

针对 Pro/E 模型导入 ADAMS 后存在部分结构缺失的问题, 本文利用 ADAMS 的几何模型生成器修补该部件结构。

在将三维模型导入后, 需要将各零部件的几何体的空间位置定位至正确的位置上, 本文对需要修改位置的导入部件调整其定位点的坐标和绕三轴旋转角度, 使其定位到正确的空间, 并使其指向符合实际需求, 以便于后面进行零部件相对运动关系的定义及正确的运动副的施加。

在完成月球车零部件几何体的导入及空间定位后, 在 ADAMS 中定义对各零部件的质量、惯量及质心位置, 这些参数是进行月球车动力学计算的基础数据。在 ADAMS 中, 零部件质量、惯量及质心位置的定义可采用以下两种方式:

(1) 对于均质材料, 可以直接定义材料的密度, 由 ADAMS 根据零部件几何体的形状自动计算出这 3 个参数;

(2) 对于非均质材料, 可以根据 CAD 软件测量的或实测的零部件质量、惯量信息, 可以手工输入。

利用 ADAMS 的质量测量和计算功能确定各个构件的质量, 转动惯量和质心位置。首先指定各

个构件的材料密度, 再根据几何体积计算出质量相关属性。本文为通过指定主/副摇臂和悬架机构的材料类型(为 steel)设置其密度为钢铁材质的默认值, 从而使 ADAMS 解算器能够根据体积等因素自动计算其质量和转动惯量。

对计算结果不符合实际状态或软件对其材质没有预定义值的部件, 本文采用直接将已知量设定给具体参量的方法完成月球车物理特性的设置。这部分工作需要保证和实际相符, 才可形成正确的运动微分方程。本文设置模型时, 严格按照实际物理器件的设计说明进行定义。例如, 由于太阳翼材质在 ADAMS 中没有类似的定义, 需要通过直接指定的方式设置。车体安装的恒温装置、全向天线等设备在车体上的位置固定不变, 因此本文采用将其固定为一个整体, 设定其等效质量和转动惯量。通过合并没有相对运动的部件后, 将部件分为 19 个大类, 其中差动机构传输轴、主/副摇臂、车轴等采用均质材料定义方法指定其材料类型, 完成质量等属性的定义, 车体、车轮、太阳翼等采用非均质材料定义方法指定其质量、惯量等物理属性。

为实现展示效果和建模简化的目标, 每个车轮均包含显式车轮和隐式轮毂两部分, 分别用于显式和实际轮壤作用力定义, 显式车轮和隐式轮毂之间用固定副将其关联起来。其中, 显式车轮用于虚拟环境显式, 隐式轮毂用于定义车轮与月面的接触力, 从而避免显式车轮叶片插入月面的复杂问题建模。6 个车轮额外引入 6 个隐式部件, 与车体本身的 28 个部件一起, 共计 34 个部件。

2.2 运动部件约束关系建模

多体动力学的建模工作, 重点在系统拓扑关系的描述。拓扑关系即各个构件之间的连接关系, 也称为约束, 具体类型有铰接和驱动等。在月球车上使用较多的约束关系为转动副, 耦合副, 然后各个关节上再配上对应驱动。

在完成月球车零部件几何建模、定位及零部件质量属性的定义之后, 需要根据月球车上各零部件

之间的拓扑结构关系进行定义才能将这些零部件有机的结合起来, 确保同实际机构的一致性。本节在 ADAMS 中定义零部件之间合适的运动约束, 即运动副, 如球铰、平动铰、旋转铰(如车轮与车轴、摇臂及摇臂轴之间等的相对旋转运动)以及差动式平衡悬架的耦合副等, 并可根据实际机构中存在的摩擦, 在运动副定义时引入摩擦效应。

太阳翼通过展开驱动机构的驱动和控制, 实现任意位置的定位和保持, 所以应在太阳翼与车体之间建立一个绕展开轴旋转的转动副。桅杆展开机构的驱动和控制要求在桅杆上选择一个参考点, 建立其与车体关于展开轴的转动副。在桅杆偏航机构、云台俯仰机构和机械臂的各关节上建立同样的转动副, 完成各活动机构的约束建模。

月球车的六个车轮只有前后四轮能够转向, 因此需要为这四轮定义转向约束, 本文定义转向约束为车轮转向机构与主/副摇臂关于转轴的转动副。车轮滚动行为定义为轮上一点关于该轮滚动轴之间的转动副。以左前轮为例, 其与显式车轮之间采用旋转副连接, 即车轮绕转向轴与车轮接触点旋转, 确保车轮能够向前滚动。同时, 转向轴与左主摇臂之间也有一个旋转副, 该旋转副定义了转向轴绕自身轴线转动的约束。

月球车最复杂的约束模型是差动机构模型, 差速器是其中的核心部件。通常的差速器通过一个输入主轴传入运动, 两个输出轴导出运动, 两个输出轴的转速和输入主轴的转速符合一个加法规律。但月球车上的差速器是上述工作过程的逆向使用。左右主摇臂通过车轮的激励会产生绕左右输入轴的转动, 然后通过车体上连接一个绕竖直轴转动的构件使得同车体建立关系, 然后将左右轴相对车体的转动副与绕竖直轴转动的转动副利用耦合副建立差速器的加法规律, 从而建立完整的差速器模型。该模型采用逆行差速器, 即两个转轴为输入、竖直转动轴为输出, 确保了在月面崎岖不平的仿真环境下车载仪器的安全, 以及车辆走行的可靠。该逆行差速器将月面传过来的不平响应尽量降低, 使

得即使月面不平较大, 但最终反映在车体上会通过差速器的加法规律降低影响, 从而满足仿真要求。本文采用转动副建立起车体与车轴之间的约束模型, 采用转动副建立差动机构和车体之间联系。左/右车轴分别与左/右摇臂固定, 从而使车体通过转动副与左右摇臂关联。左右摇臂上的转动副又通过耦合副分别与差动机构关联起来, 完成差动机构的建模。该模型保证左右摇臂在相互摆动时, 车体作相应动作。图 2 给出了差动机构的约束关系图, 差动机构由 3 个转动副和 2 个耦合副将左右车轴、差速轴和车体约束在一起, 上方的合页定义了差速器和车体之间的转动副 JOINT_revo_release, 左侧的合页定义了左车轴和车体之间的转动副 JOINT_revo_chezhou_1_cheti, 右侧的合页定义了右车轴和车体之间的转动副 JOINT_revo_chezhou_2_cheti, 左侧高亮显示的耦合副将 JOINT_revo_chezhou_1_cheti 和 JOINT_revo_release 耦合在一起, 右侧的耦合副将 JOINT_revo_chezhou_2_cheti 和 JOINT_revo_release 耦合在一起。

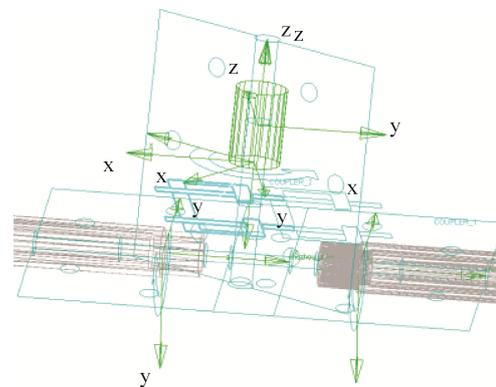


图 2 差动机构约束模型

主摇臂和副摇臂在交接位置通过转动副相连, 转向臂通过倾斜的转动副与主摇臂和副摇臂对应关联, 然后前后 4 个车轮的滚动轴与转向轴固定, 中间两个车轮的滚动轴与副摇臂固定, 从而确保月球车在月面上行驶时车体的运动状态稳定可靠。

完成车辆底盘的建模后, 还需要建立机械臂系统模型, 该模型将为科学探测仿真提供数据。机械臂的底座连接在车体侧板上, 然后通过转动副连接

方位, 俯仰等构件, 通过转动副模拟腕关节。

桅杆上包括天线等设备, 针对其运动特点, 定义了天线体、桅杆俯仰关节、云台三部分, 其中天线体为包含桅杆主体和其上天线的部件, 其与云台通过旋转副关联, 该旋转副完成云台俯仰动作约束。天线体与桅杆俯仰关节通过旋转副关联, 使得桅杆能够左右转动。桅杆俯仰关节与车体之间通过旋转副连接, 完成桅杆的展开约束。

太阳翼分别定义了宽、窄太阳翼, 共计 2 个部件, 它们分别通过旋转副约束在车体两侧。月面的具体形态使用一个部件定义, 该部件通过固定副与大地(ground)关联。

通过给各活动关节定义运动约束, 本文定义了 23 个转动副、1 个平移约束(机械臂的伸缩端)、9 个固定约束和 2 个耦合副, 确保模型中各部件之间的相对运动关系保持不变, 从而由 ADAMS 软件分析与模拟环境因素与运动过程对月球车的影响, 使设计人员可以只关注月球车的运动效果, 而不需要考虑复杂的机械运动学计算。

2.3 电机驱动力矩建模

对于月球车的动力学仿真来说, 需要定义车轮、机械臂、太阳能帆板展开机构、天线、雷达及摄像机等机构的驱动电机的驱动力矩与电机转速的函数关系, 对月球车的运行姿态进行控制。

为了实现太阳翼展开过程, 需要在帆板与车体之间的旋转副上施加对应的驱动, 该驱动为旋转驱动(Rotational), 定义为位移类型(Displacement), 关于时间的变化函数表达式为 0, 表示太阳翼展开旋转不随时间变化, 即保持静止。当需仿真太阳翼展开运动时, 通过设置该驱动的时间变化函数完成太阳翼展开过程。同理定义-Y 太阳翼展开驱动。

本文对云台俯仰约束定义了转动电机力矩, 实现了云台俯仰驱动。该俯仰驱动方向定义为旋转类型, 时间函数定义为 0, 即不随时间变化。驱动类型为位移类型, 计算模型为云台上一点绕转动轴圆点旋转的弧度。同理定义桅杆的展开和偏移力矩、

机械臂的偏航、俯仰和腕关节力矩。

为了驱动车辆需要在前后 4 个车轮及其转向轴上施加对应的驱动, 实现车辆的运动。在前后 4 个动力轮上, 分别在车轮滚动约束上施加旋转驱动, 定义为速度量, 关于时间的变化函数表达式为 0, 表示月球车保持在月面静止。在后续仿真过程中, 可根据任务系统的注入要求设定驱动的时间变化函数为月球车行走的期望车轮转速。

在 4 个转向轮上分别施加转动类型的驱动, 每个驱动轮上还需要设定模拟电机的驱动, 这样车辆的转向和行驶动力都完成了定义。本文定义车轮转向机构转向电机的转向驱动属性为该驱动为在主摇臂和转向轴之间的旋转副上的转向驱动, 该驱动类型为速度量, 即其时间变化函数给出转向驱动的旋转速度, 根据任务系统注入要求修改时间函数设定转向速度。

通过在运动约束上建立驱动, 本文为月球车定义了 14 种驱动, 使得虚拟样机可根据注入要求驱动行走系统和活动机构, 完成月面巡视与探测工作仿真, 为月球车运动过程仿真提供基础。

3 实验

本文在 Windows 7 上使用 Adams2013 实现了月球车虚拟样机模型, 在该模型中定义车头朝向为 x 轴方向, z 轴指向月心, 以右手法则指定 y 轴方向。针对虚拟样机活动机构与运动姿态关系, 本文设计了一系列实验, 采用脚本的形式指定各时间段各驱动力的大小和变化方式, 实验的时序如下: 设置月球车在第 0~1 s 内左太阳翼展开驱动为位移变化, 即从 0°展开至 190°; 在第 1~2 s 内设置右太阳翼展开驱动为位移变化, 展开角度从 0°展开至 180°; 设置桅杆展开驱动为位移驱动, 在第 2~3 s 内从 0°展开至 90°; 在第 3~3.5 s 设置 4 个动力轮滚动驱动为速度量, 从速度为 0 加速到 25°/s, 然后保持该速度向前行驶。

图 3 给出了动力轮(左前轮)和辅助轮(左中轮)速度变化曲线图, 其中红色的实线为动力轮轮速

线, 蓝色的虚线为辅助轮轮速线。从图中可以看出作为动力轮, 在加速前(<3 s)其速度为 0, 但是由于 0~3 s 内结构机构展开太阳翼和桅杆, 导致差动机构进行了主副摇臂的调整, 因此迫使中间的从动轮有一定的微小滚动, 在图中体现为中轮有速度的变化。3~3.5 s 动力轮开始加速, 辅助轮也紧随其后加速, 3.5 s 后动力轮的轮速稳定在 $25^\circ/\text{s}$ 附近, 辅助轮的轮速也在这个附近波动。

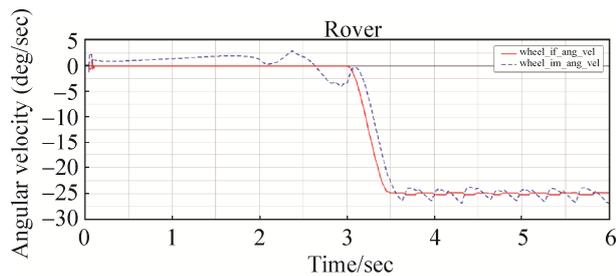
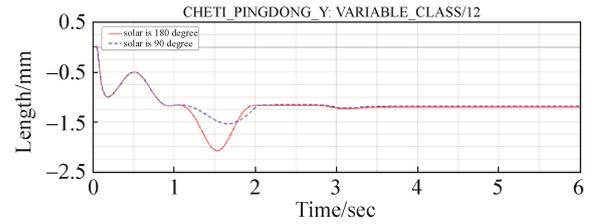
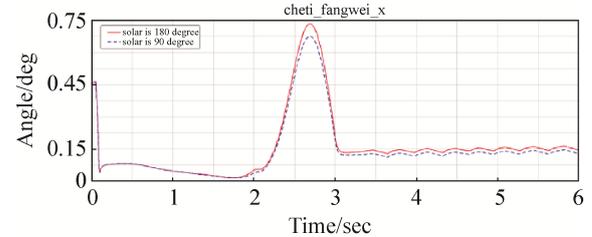


图 3 动力轮和辅助轮轮速变化图

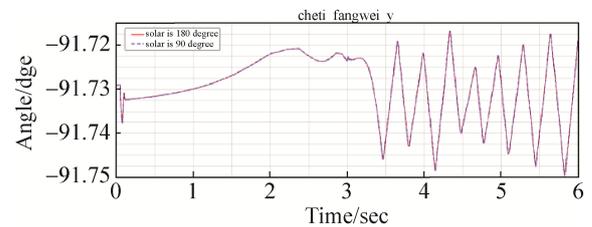
为了检验活动机构的状态对月球车位姿的影响, 本文设计了右侧太阳翼在展开 180° 和 90° 两种条件下的月球车运动状态比较实验, 在前述时序过程中分别将右太阳翼展开至 180° (实线) 和 90° (虚线), 部分比较结果如图 4 所示。从(a)可看出, 在右太阳翼展开时, 由于展开的角度不同造成的车体横向最大偏移也不同, 展开 180° 的过程中由于右太阳翼质心右移距离大于展开 90° 的过程, 因此车体向 -Y 偏移也较大。太阳翼展开完毕后, 两种情况的横向偏移回归一致。(b)说明太阳翼展开角度不一致使得车体等效质心在 y 轴方向存在一定的差异, 导致于后续运动的车体滚动角略有变化。(c)表明太阳翼的展开角度不影响车的俯仰角, 原因是太阳翼与 y 轴垂直, 因此对于关于 y 轴的变化角度无影响。(d)表明在右太阳翼展开过程中, 由于展开角度的差异导致该过程的偏航角度变化幅度略有差异, 展开角度越大, 偏航角度起伏越明显; 太阳翼展开过程结束后, 太阳翼的展开角度对后续车体活动与直行无影响。(e)(f)表明太阳翼的展开的角度不影响月面巡视和科学探测过程中主副摇臂的张角, 即对差动机构无影响。



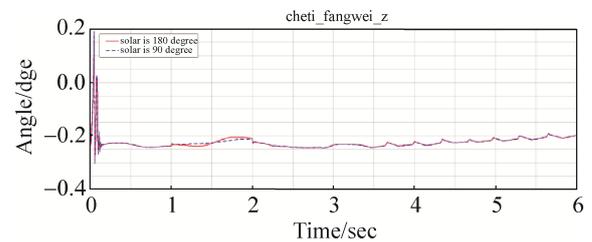
(a) Y 轴方向平移曲线



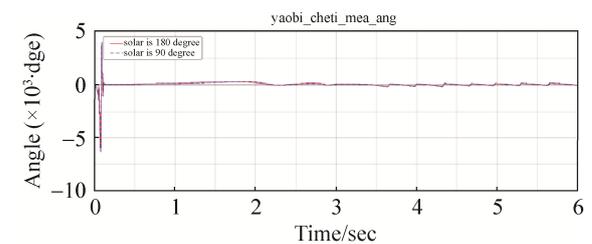
(b) 月球车滚动角变化曲线



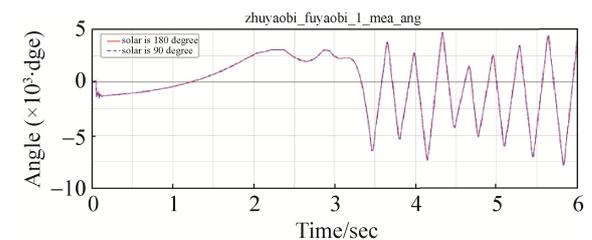
(c) 月球车俯仰角变化曲线



(d) 月球车偏航角变化曲线



(e) 月球车主摇臂与车体夹角变化曲线



(f) 月球车主副摇臂夹角变化曲线

图 4 太阳翼展开角度对运动的影响

以往的仿真训练环境对机械运动特性的模拟非常难以涉及,各参数的模拟方法均采用较为简单的函数模拟,不能给出月球车作为一个整体进行科学探测和月面巡视过程中各关键参数变化规律。上述实验表明虚拟样机模型是一个有机整体,ADAMS 求解器能将活动机构的活动影响通过约束反映到各部件上,并影响其它部件的状态,使得遥测参数的变化符合机械运动特性。将虚拟样机引入遥操作仿真训练系统的方法,为人员训练提供了一个符合机械运动特性的仿真训练环境,达到了人员提前感知遥操作过程的目标。

4 结论

基于 ADAMS 的月球车虚拟样机模型可以对月球车的活动机构的运动和车体姿态信息做一个详细而又准确模拟,开发人员只需要关注月球车自身的三维模型和应用需求,从繁琐的运动学方程建模和求解中解放出来,有效降低了多体动力学仿真的理论门槛,加快了遥操作仿真系统的准备工作,使广大遥操作人员提前熟悉了月球车探测和巡视过程中参数变化的特点,提高了参试人员及时发现遥操作过程中月球车异常情况的能力。

未来的工作有:研究月球车虚拟样机的机电一体化建模方法,实现月球车方位设定的参数化模型。

参考文献:

- [1] 贾智宏,葛藤,周克栋. 基于 ADAMS 的自动武器虚拟样机研究 [J]. 系统仿真学报, 2008, 20(3): 648-650. (Jia Zhihong, Ge Teng, Zhou Kedong. Study on Virtual Prototype Technology of Automatic Weapon Based on Dynamic Simulation Software-ADAMS [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2008, 20(3): 648-650.)
- [2] 朱春霞,朱立达,刘永贤,等. 基于 ADAMS 的并联机器人振动特性仿真及结构优化 [J]. 系统仿真学报, 2008, 20(14): 3721-3725. (Zhu Chunxia, Zhu Lida, Liu Yongxian, et al. Simulation of Vibration Characteristic and Optimization for Parallel Robot Based on ADAMS [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2008, 20(14): 3721-3725.)
- [3] 王楷焱,史文库,杨昌海,等. 基于 ADAMS 的商用车驾驶室悬置系统的振动模态和传递特性 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2010, 40(2): 330-334. (Wang Kaiyan, Shi Wenku, Yang Changhai, et al. Commercial vehicle cab suspension system vibration modes and transmission characteristics by means of ADAMS [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2010, 40(2): 330-334.)
- [4] 刘广,郑铁生. 基于虚拟样机技术的舵系统动力学仿真研究 [J]. 系统仿真学报, 2011, 23(3): 502-505. (Liu Guang, Zheng Tiesheng. Dynamic Simulation Study of Rudder System Based on Virtual Prototype Technology. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2011, 23(3): 502-505.)
- [5] 胡娜,陈勇,王红星,等. 基于 ADAMS 的农田信息采集机器人仿真分析 [J]. 系统仿真学报, 2011, 23(7): 1507-1512. (Hu Na, Chen Yong, Wang Hong-xing, Ju Rong-hua. Simulation of Information Collection Robot in Agricultural Fields Based on ADAMS[J]. Journal of System Simulation, 2011, 23(7): 1507-1512.)
- [6] 桑胜举,沈丁,赵继超,等. 基于 ADAMS 的电磁驱动球形机器人运动仿真研究 [J]. 系统仿真学报, 2013, 25(7): 1568-1573. (Sang Shengju, Shen Ding, Zhao Ji. Research on Motion Simulation of Solenoid Driving Spherical Robot Based on ADAMS [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2013, 25(7): 1568-1573.)