

卫星 GN&C 分系统建模与仿真软件实现

廖守亿¹, 陈 坚¹, 陆宏伟²

LIAO Shou-yi¹, CHEN Jian¹, LU Hong-wei²

1. 第二炮兵工程学院 测试与控制工程系, 西安 710025

2. 北京信息高技术研究所, 北京 100085

1. Department of Test & Control Engineering, The Second Artillery Engineering College, Xi'an 710025, China

2. Beijing Information and High Technology Research Institute, Beijing 100085, China

E-mail: lsy_nudt@sohu.com

LIAO Shou-yi, CHEN Jian, LU Hong-wei. Implementation of modeling and simulation software for satellite Guidance, Navigation and Control. Computer Engineering and Applications, 2008, 44(35): 213-216.

Abstract: The design, optimization and simulation of Guidance, Navigation and Control (GN&C) system are necessary for both the design and on-orbit operations of satellites. However, the variety of GN&C system schemes and algorithm complexity are detrimental to the rapid design, simulation and decision-making. To address the issue, a modeling and simulation software environment programmed by VC and Matlab for satellite GN&C system, called GN&C, is designed and implemented using Matlab/Simulink as a computation engine. The software can effectively filter out laborious details in building GN&C simulation system, thus can evaluate the performance of the GN&C system by simulation.

Key words: Guidance, Navigation and Control (GN&C); satellite system; design; modeling and simulation

摘 要: 卫星系统的总体设计以及在轨运行等任务都离不开对其制导、导航与控制 (GN&C) 分系统的设计、优化与仿真演示, 但 GN&C 分系统方案以及算法的复杂性对于 GN&C 分系统的快速设计、仿真与决策非常不利。采用 Matlab/Simulink 作为后台计算引擎、利用 Matlab 与 VC 混合编程, 设计实现了一个卫星 GN&C 分系统建模与仿真软件环境。该软件环境能够屏蔽 GN&C 分系统的构建细节从而快速搭建具体的仿真应用, 可实现对卫星 GN&C 分系统方案的快速仿真评估, 并实现建模环境与具体的仿真应用相分离。

关键词: 制导、导航与控制; 卫星系统; 设计; 建模与仿真

DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.2008.35.64 **文章编号:** 1002-8331(2008)35-0213-04 **文献标识码:** A **中图分类号:** TP391.9

1 引言

卫星系统的总体仿真与演示验证是航天装备总体设计与评估的重要内容, 美、俄和欧空局都投入大量经费用于其研究与开发, 并广泛应用于卫星系统的总体设计中。卫星系统各分系统的性能如何, 直接影响到航天装备体系的总体性能和作战效能, 特别是制导、导航与控制 (GN&C) 分系统、通信分系统以及有效载荷分系统, 直接影响航天装备的信息获取及传输能力, 进而影响任务的完成。

GN&C 分系统在卫星系统中具有重要的地位。卫星的 GN&C 分系统任务多, 设计方案中的部件、方法等有多种选择, 要获得满意的设计方案必须对可能的方案组合进行探索性仿真分析。因此迫切需要建立一个柔性的建模与仿真环境, 封装 GN&C 内部部件、方法的具体信息, 为用户提供一个灵活方便的设计与仿真环境。本文对 GN&C 分系统进行建模与仿真研究, 研制了相关的软件环境“卫星 GN&C 分系统建模与仿真软

件(简称 GN&C)”。

2 卫星 GN&C 分系统

GN&C 分系统主要任务是在卫星的整个运行期间内, 控制卫星稳定运行, 指向适当的方向, 并且使卫星按照任务要求进行机动。“制导”指的是卫星在空间的目标位置已知的情况下, 利用导航数据, 通过推进机动过程把卫星引导到预定的位置, 如轨道调整或轨道转移;“导航”是指在航天器整个任务运行期间, 时时测量并确定航天器质心位置和速度的过程, 实现导航功能的系统称为导航系统, 其核心功能是实时提供航天器的质心位置和速度信息;“控制”指的是确定卫星的姿态并进行控制。

对卫星 GN&C 分系统的总体设计进行仿真就是要对 GN&C 完成各种轨控和姿控任务的效果进行评估, 进而评估 GN&C 分系统的总体设计方案的优劣。

基金项目: 国家部委预研基金资助项目 (the Pre-Research Foundation of China Ministries and Commissions)。

作者简介: 廖守亿 (1974-), 男, 博士后, 讲师, 主研领域为飞行器系统建模与仿真、复杂系统建模与仿真、基于 Agent 的建模与仿真; 陈坚 (1969-), 男, 博士生, 副教授, 主研领域为导航、制导与控制; 陆宏伟 (1975-), 男, 博士, 助理研究员, 主研领域为计算机仿真、图像处理。

收稿日期: 2007-12-13 **修回日期:** 2008-03-03

3 模型及相关算法

GN&C 任务的完成,需要硬件设备和软件(方法的)相互协调配合;设备决定了应该使用的方法;同一任务可以选用不同的硬件设备、采用不同的方法来完成,但不同的设备和方法的配合产生的效果可能是不同的。因而 GN&C 分系统的方案设计必须考虑硬件设备和软件(算法)方面。

3.1 制导部分

制导部分主要讨论轨道调整与轨道转移。

轨道调整:在卫星发射过程中,由于存在各种干扰以及系统本身存在误差,因而卫星实际的轨道不可避免地偏离标称轨道。为了消除由入轨条件偏差而产生的轨道偏差(基本轨道参数偏差)而进行的轨道改变称为轨道调整,主要考虑了近地点远地点高度的修正、轨道长半轴、升交点赤经与偏心率的调整模型。

轨道转移:轨道转移是指航天器在控制系统作用下,由沿初始轨道(或称停泊轨道)运动改变为沿目标轨道运动的一种轨道机动。轨道转移主要考虑脉冲轨道转移和有限推力轨道转移。脉冲轨道转移主要考虑双脉冲和三脉冲轨道转移。有限推力轨道转移问题采用最优控制理论来求解。

3.2 导航部分

卫星的导航即轨道确定,其方式主要有地面测控站导航、GPS/GLONASS 导航、跟踪与数据中继卫星导航、卫星自主导航等。这里阐述导航系统的导航设备(即传感器)和导航方法两部分。

导航设备:卫星导航敏感设备主要有:惯性测量部件(陀螺仪和加速度计)、太阳敏感器(又分为 3 种基本类型,即太阳出现敏感器、模拟式太阳敏感器和数字式太阳敏感器)、星敏感器(星扫描器、星跟踪器和星图仪)、地平敏感器(可见光地平敏感器和红外地平敏感器)、磁强计、空间六分仪和射频敏感器等。

导航方法:导航方法主要考虑了地面测控站导航、惯性导航、地磁导航、星敏感器天文自主导航、导航星导航以及自主组合导航(包括地磁/GPS 组合导航、星敏感器加星间测距导航和惯性/GPS 组合导航)。

此外,导航方法还包括中继星导航、基于星间相对测量的卫星星座导航等。

3.3 控制部分

卫星的姿态稳定控制类型包括自旋稳定(单自旋稳定、双自旋稳定)、重力梯度稳定、磁力矩姿态控制和三轴姿态稳定^[1-2]。由于三轴姿态稳定已逐渐成为卫星姿态稳定的主流,因此这里主要考虑这种方法。而太阳辐射压力矩控制、气动力矩控制等由于在实际工程中应用较少或只是作为辅助控制方式,这里不予以考虑。

三轴姿态稳定包括零动量喷气控制、零动量飞轮控制和偏置动量飞轮控制等。

4 软件设计目标

GN&C 分系统软件的设计目标是提供一个卫星 GN&C 分

系统设计与分析仿真环境,让用户能够灵活选择各种不同的 GN&C 部件(硬件)、方法组成设计方案,并对其进行仿真分析与评估,为 GN&C 方案设计提供支持。设计中重点解决建模环境与仿真实验分离;做到灵活性与开放性,易于扩展与维护。这样用户可以在一个通用的建模环境中对 GN&C 分系统进行建模,设定相应的任务并设置好仿真运行参数后即可进行仿真实验。GN&C 分系统仿真的基本思路如图 1 所示。

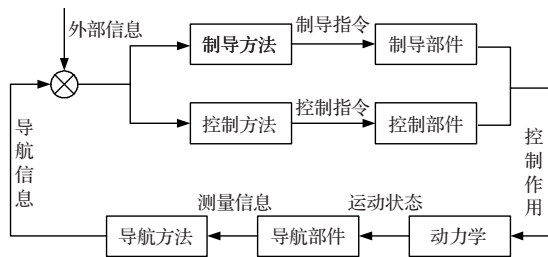


图 1 卫星 GN&C 分系统的仿真基本思路

针对 GN&C 分系统仿真的基本过程,将 GN&C 分系统采用的模型划分为图 1 中的各个模块类型,各类模块之间以固定的方式连接。模块之间的接口参数也按图 1 来分类。采用一种灵活的、可互换式的模型组装连接方式,实现同一类型的不同模块模型之间的可互换,即实现设计方案选择的灵活性,由接口参数的一致性来保证各模块模型的正确连接,形成一个一致的仿真模型。

5 软件实现

软件系统“卫星 GN&C 分系统建模与仿真软件”采用基于 Agent 的建模与仿真方法^[3]的思想,整个建模与仿真环境以开放的体系结构逐步实施。系统开发平台采用 WindowsXP,开发环境为 VC++6.0,需要 Matlab/Simulink 的支持。数据库系统采用 Microsoft SQL Server2000。GN&C 模型以 Matlab/Simulink 模块原型的形式存在。用户通过界面输入 GN&C 设计方案与参数、添加 GN&C 任务及实现方法,功能算法程序由此获得构建系统的信息,并根据这些信息调用 Matlab/Simulink,由各个模块构建仿真系统,Matlab/Simulink 作为后台计算引擎进行相应的仿真解算。

5.1 总体框架

GN&C 分系统建模与仿真软件的基本框架如图 2 所示。软件以模块化的方式把系统分为相应的功能 Agent,以方便每个部分的维护、升级及扩展。其中界面 Agent、仿真控制 Agent、仿真数据管理 Agent 和连接 Agent 作为软件 Agent 参与系统的运行,它们各自以独立的线程运行,处理相关的事件。卫星的 GN&C 分系统作为一个独立的 Agent 运行于仿真系统中。系统中各主要组件包括:

界面 Agent:界面 Agent 负责相应用户的输入输出事件,实现人与软件系统的交互,它以独立的线程形式运行。

层次化建模环境:利用模型库中已有的模型或者用户添加的模型,动态组装卫星的 GN&C 分系统 Agent 模型,同时能够进行模型参数的设置、保存和加载,系统组成的层次结构可灵

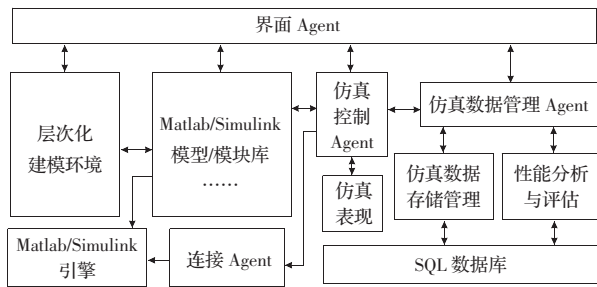


图2 GN&C 分系统建模与仿真软件结构

活配置, 实体数量无限制。

Matlab/Simulink 模型/模块库: 包括各种部件和方法、任务的 Matlab/Simulink 模型。

仿真控制 Agent: 对仿真实验参数进行设置, 并进行仿真控制, 其中包括仿真启动、终止、暂停/恢复运行、仿真记录与回放等功能, 它以线程的方式运行。

连接 Agent: 对动态组装的 GN&C 分系统进行连接, 按照一定的连接顺序生成可被 Matlab/Simulink 识别的关联矩阵。

仿真表现: 它包括仿真结果的图形、图表及文字表现, 以及仿真报告的生成。

仿真数据管理 Agent: 软件在使用过程中将产生大量的仿真数据, 必须对这些数据进行管理以便实现仿真实验的可重复性, 同时也方便其它应用系统的调用以实现可扩展。它以线程的形式运行, 通过预定义的数据收集结构, 定时提取相关数据。

仿真数据存储管理: 将仿真实验的中间数据和最终结果等信息保存在数据库中, 供其它应用系统分析调用。

性能分析与评估: 根据总体设计对 GN&C 分系统的性能要求, 结合仿真结果进行性能分析与评估。

软件系统的处理流程如图 3 所示。

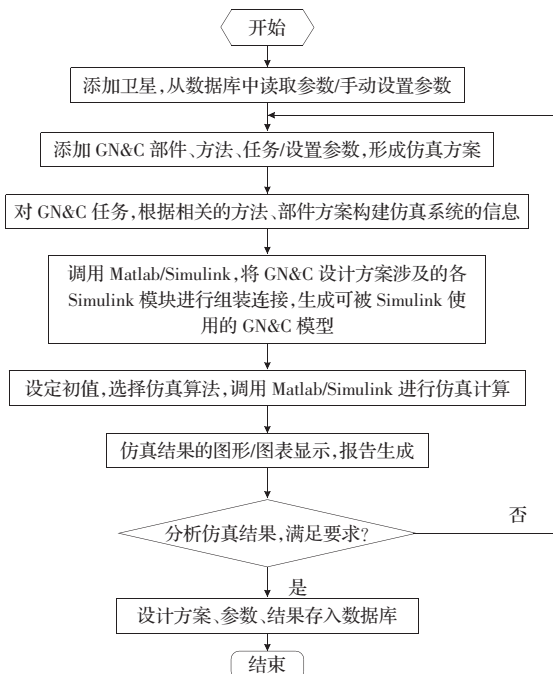


图3 GN&C 分系统仿真的处理流程

5.2 模块/模型库的扩展与维护

功能算法程序中维护一个 Simulink 模块原型库的信息列表, 该表的内容保存在本地 XML 文件中, 软件初始化时读入。该表的存在使得 C++ 编写的模块类的对象能与已开发的 Simulink 模块原型对应起来, 让用户方便地在设计方案中添加相应模块, 并帮助确定模块的连接关系。通过向 Simulink 模块原型库添加新开发的模块原型, 并在模块原型库信息表中注册其信息, 就能实现对模块原型库的扩展, 以方便使用新的方法、部件。同样可以修改、更新和删除已有的模块, 进行维护和升级。模块原型库信息表包含模块原型信息表和接口参数信息表, 其中模块原型信息表保存了各模块原型的信息, 接口参数信息表为各模块原型所有接口参数的信息列表。

5.3 模块连接关系的关联矩阵

模块之间的连接关系用关联矩阵来表示, 如表 1。它由功能算法程序根据用户设计的方案和模块信息表来生成, 被传递到 Matlab 接口中, 为调用 Matlab 引擎组装 Simulink 模块时所用。

表 1 模块连接的关联矩阵示意图

输入	输出						
	模块 1		模块 2		模块 3		
	out1	out2	out1	out1	out2	out3	
模块 1	in1	0	0	0	0	1	0
	in2	0	0	1	0	0	0
模块 2	in1	1	0	0	0	0	0
	in2	0	1	0	0	0	0
模块 3	in3	0	0	0	0	0	1
	in1	0	0	0	0	0	0
	in2	1	0	0	0	0	0

其中 1 表示一个连接关系; 0 表示无连接关系; 行之和不大于 1, 表示每个输入端口最多只能有一个输入; 列之和可大于 1, 表示一个输出参数可同时连接到多个输入端口; 行之和为 0 说明该行对应的参数需外部输入; 列之和为 0 说明该行对应的输出参数闲置。

模块对象之间按下述方式连接, 以生成模块之间的关联矩阵:

- (1) 各类模块之间有固定的连接顺序, 即不同类模块只能按图 1 中的顺序连接, 不相邻的两类模块不能连接;
- (2) 同类模块应可以互换, 而同一类的不同模块的输入、输出参数又不完全相同, 模块连接时保证上一模块的输出端口参数与下一模块的输入端口参数一致, 即根据输出模块和输入模块的模块原型接口参数统一标号是否相同判定端口能否相连;
- (3) 对设计方案给出的各个模块对象, 按上面两条规则依次连接其每个输入参数, 直到所有模块的输入参数连接完毕, 即可得到关联矩阵。

5.4 实现的功能

软件实现的功能是: 在卫星 GN&C 分系统建模与仿真软件中, 使用户能够选择各种不同的 GN&C 部件、方法组成设计

方案,设置各部件、方法的参数,将各种类型的部件、方法灵活组装,形成一个一致的 GN&C 方案,设置空间环境和任务想定后,对其进行仿真分析,获得评价参数。软件采用开放式体系结构,可方便地添加新的模型模块和对原有模型模块进行修改、升级。现阶段已实现的模型功能模块包括:

制导模块。制导模块实现的功能/模型有:远地点高度修正模型;近地点高度修正模型;长半轴与偏心率率的调整模型;双脉冲共面同轴圆形轨道之间的转移;双脉冲共面同轴椭圆形轨道之间的转移——长距离转移;双脉冲共面同轴椭圆形轨道之间的转移——短距离转移;三脉冲共面同轴圆形轨道之间的转移。

导航模块。导航模块实现的功能/模型有:双轴组合式太阳敏感器导航;地平面穿越式红外地平仪导航;地面站导航。

控制模块。控制模块实现的功能/模型有:不考虑挠性运动的姿态动力学全量模型;三轴独立 PID 控制器;固定偏置动量控制器;二自由度偏置动量控制器;零动量喷气控制执行机构;三正交飞轮控制执行机构;四飞轮控制执行机构;固定偏置动量执行机构;二自由度偏置角动量控制执行机构。

5.5 软件运行

软件总体界面如图 4 所示。用户可通过菜单/工具条在想定编辑框中添加各种对象实体,完成 GN&C 的层次结构建模,一个卫星 GN&C 分系统方案包括导航部件、制导部件/任务和任务控制部件/任务。用户只需在相应的节点添加条目、设置参数即可。

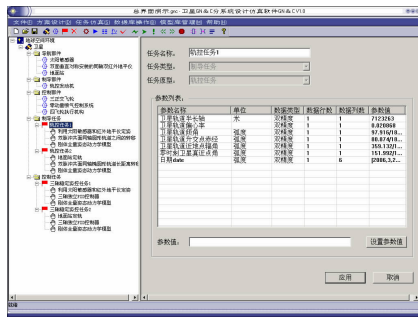


图 4 卫星 GN&C 分系统建模与仿真软件主界面

添加任务和添加卫星界面分别如图 5、图 6 所示。仿真计算后生成的结果曲线如图 7 所示。



图 5 “添加任务”界面



图 6 “添加卫星”界面

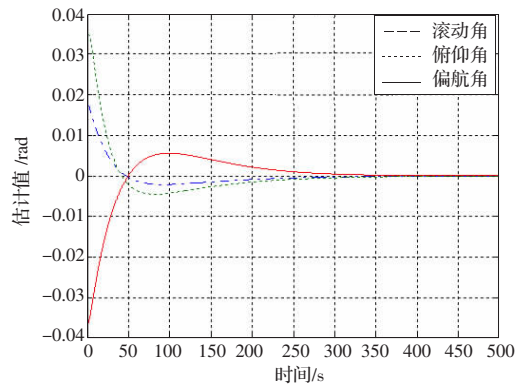


图 7 仿真输出

星在轨运行支持。通过事先建立当前在轨卫星的模型,按照卫星的实际运行情况对卫星的姿、轨控任务进行快速仿真演示,因此可对意外或突发事件进行快速反应,通过仿真寻求解决方案。

参考文献:

- [1] 刘良栋,刘慎钊,刘承启,等.卫星控制系统仿真技术[M].北京:宇航出版社,2003.
- [2] 黄福铭,郝和年,曾颖超,等.航天器飞行控制与仿真[M].北京:国防工业出版社,2004.
- [3] 廖守亿.复杂系统基于 Agent 的建模与仿真方法研究及应用[D].长沙:国防科技大学研究生院,2005.

6 结束语

实现了一个卫星 GN&C 分系统建模与仿真软件环境,该软件环境除可用于 GN&C 分系统的方案设计与优选、比较外,也可用于卫星测控以及空间作战决策支持,还可用于卫