

STK在航天任务 仿真分析中的应用

丁溯泉 张波 刘世勇 编著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

STK 在航天任务 仿真分析中的应用

丁溯泉 张波 刘世勇 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书以近地轨道航天器、月球探测卫星和深空探测器的测控性能分析为背景,研究了 STK(Satellite Tool Kit)在航天任务中仿真分析中的应用。

内容主要包括:STK 中关于航天任务基础知识的表述,太阳同步轨道卫星仿真分析,运载火箭弹道和姿态仿真及测控性能分析,月球探测卫星轨道和姿态仿真及测控性能分析,星地测控链路性能仿真分析,干扰性能仿真分析,深空探测器轨道仿真和测控性能分析以及利用 STK/Matlab 接口函数解决复杂航天任务仿真分析的问题。

本书适用于使用 STK 进行航天任务设计与分析的科研人员,同时也可作为高等院校相关专业学生的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

STK 在航天任务仿真分析中的应用/丁溯泉,张波,
刘世勇编著. —北京:国防工业出版社,2011.12

ISBN 978-7-118-07656-1

I. ①S… II. ①丁… ②张… ③刘… III. ①航天器
—计算机仿真 IV. ①V411.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 279939 号

※

国防工业出版社出版发行
(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 880×1230 1/32 印张 9¼ 字数 264 千字

2011 年 12 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 36.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

国防工业出版社

序

现代科学技术、大型工程项目和新型科技产品,因其技术复杂性、过程一次性和投入风险大等原因,在其初始阶段大多要进行仿真。所谓仿真,就是在技术、工程和产品实物并不存在或者部分不存在或者性能不完善的情况下,对其进行设计、优化、测试、试验的一种方法。仿真有实物仿真、半实物仿真和数字仿真之分,数字仿真又称为计算机仿真。就其实现的难易程度和投入成本大小而言,数字仿真要优于前面两种。数字仿真的关键是要有适用的、方便的仿真软件。本书介绍的 STK (Satellite Tool Kit) 软件,就是一款在航天、C⁴ISR (指挥、控制、通信、计算机、情报、监测和侦察)、航空和无人驾驶飞行器、导弹防御和电子系统等诸多领域应用广泛,功能强大,使用方便的数字仿真软件。

STK (Satellite Tool Kit) 软件是美国 AGI (Analytical Graphics, Inc.) 公司开发的一款在航天工业领域处于领先地位的商品化系统仿真和分析软件,它可以快速方便地分析复杂的陆、海、空、天、电任务,并提供易于理解的图表和文本形式的分析结果,确定最佳解决方案。它支持航天任务周期的全过程,包括政策、概念、需求、设计、制造、测试、发射、运行和应用。STK 平台是一个通用的建模和分析平台,适用于航天、防御和智能系统,版本多次升级,并经过了多种任务的验证。

本书是我国仿真软件领域近期内容较新的一部专著,作者长期从事航天工程的总体设计工作,具有丰富的航天工程仿真实践经验,也是国内

较早使用 STK 软件的工程技术人员。作者站在总体设计者的高度,用实践者的独特眼光,从基础到专业,由概念到实例,全面、系统地介绍了 STK 软件的基本情况,STK 软件中关于坐标系、时间系统、轨道外推和轨道根数等航天任务基础知识,并以太阳同步轨道卫星为例说明了这些基础知识的应用。本书的重点是以月球探测卫星任务为背景的测控性能分析:包括卫星轨道、卫星姿态和星地链路分析。也介绍了以运载火箭为背景和以金星探测器为背景的测控性能分析。

本书的特点是叙述由浅入深,由表及里,对于初次接触者是部入门之作,对于航天界的同行们更是一本可供借鉴参考之力作。我相信,通过本书的出版,将召唤更多的工程技术人员关心和学习仿真技术,促进我国航天领域仿真技术的交流、研究和使用的,进而带动我国航天事业沿着又好又快的道路发展。

原中国载人航天工程测控通信系统总设计师

原中国绕月探测工程测控系统总设计师

于志望

前 言

我国航天事业经历了 55 年的发展历程,创造了以“两弹一星”、载人航天和探月工程三座里程碑为标志的辉煌成就。这些辉煌成就也代表了我国航天技术发展的水平,本文通过对航天任务的仿真分析也从一些侧面反映了我国航天技术的发展历程。

《2011 年中国的航天》白皮书指出:未来 5 年,要重点构建由对地观测、通信广播、导航定位等卫星组成的空间基础设施框架,初步形成长期、连续、稳定的业务服务能力;发射空间实验室、载人飞船和货运飞船,突破和掌握航天员中期驻留、再生式生命保障及推进剂补加等空间站关键技术,开展一定规模的空间应用,为空间站建设进行技术准备;实现在月球的软着陆和巡视探测,完成月球探测第二步任务。要实现这些具有挑战性的目标,要求从事航天任务的科研人员掌握先进的规划、设计、仿真和制造技术。

本书研究了利用 STK(Satellite Tool Kit)进行航天任务仿真分析的问题,利用 STK 不仅提高了仿真分析的效率和效果,而且解决了复杂航天任务的仿真分析问题,对提高航天任务仿真分析的技术水平有积极的促进作用。

全书共分 9 章。

第 1 章介绍 STK 软件的基本情况以及全书涉及的主要内容。

第 2 章介绍了 STK 中关于坐标系、时间系统、轨道外推和轨道根数等航天任务基础知识的表示方法,并结合太阳同步轨道卫星的例子说明了这些基础知识的应用。

第 3 章以运载火箭测控性能分析为背景,讨论利用外部文件输入运载火箭的弹道和姿态,利用坐标系旋转创建发射坐标系,利用二维图形显示箭下点轨迹,利用三维图像显示运载火箭姿态,分析地面站对运载火箭的跟踪覆盖性能以及天线安装角的变化范围。

第 4 章以月球探测卫星与轨道有关的测控性能分析为背景,讨论利用 STK/Astrogator 仿真卫星环绕地球、地球转移以及环绕月球的飞行轨道,创建自定义的轨道外推模型,利用二维图形显示卫星在地球和月球上的星下点轨迹,利用三维图形显示卫星的飞行轨道,分析地面站对卫星的跟踪覆盖性能,计算了卫星在地球固连坐标系中的速度和加速度以及相对于地心的径向速度和加速度,计算了日凌时的太阳—地面站—探测器(SEP)夹角,分析了月食期间的光照条件。

第 5 章以月球探测卫星与姿态有关的测控性能分析为背景,讨论在 STK 中实现自旋稳定、三轴稳定和变轨等飞行姿态,利用三维图形显示卫星的飞行姿态,利用 Vector Geometry Tool 创建矢量、平面和角度,分析地面站与卫星的角度关系。

第 6 章以月球探测卫星星地测控链路性能分析为背景,利用 STK/Communications 模块实现星地链路性能仿真,利用外部文件输入天线方向性图,在三维图形中实时显示链路性能,分析比较了仿真结果和实测结果。

第7章以两颗月球探测卫星相互干扰的性能分析为背景,利用 STK/Communications 模块提供的 comm system 组件分析了两颗月球探测卫星之间的干扰性能,还利用传感器跟踪卫星来计算两颗卫星同时落入地面站天线波束范围内的弧段,并介绍了生成发射信号的频谱以及计算带宽重叠因子的方法。

第8章以金星探测器测控性能分析为背景,讨论在 STK 中实现深空探测器的轨道仿真,利用三维图形显示地金转移和环绕金星的飞行轨道,创建环绕金星的质心外推模型,分析了地面站对探测器的跟踪覆盖性能,计算了金星处于上合及下合时的 SEP 角。

第9章以复杂航天任务仿真分析为背景,介绍了利用 STK/Matlab 接口函数解决航天任务分析中需要多次循环和嵌套迭代问题的方法,介绍了 STK/Matlab 接口,并对其中常用和基本的接口函数做了说明。

本书第1章、第2章、第6章~第8章由丁溯泉编写,第3章~第5章由丁溯泉和张波编写,第9章由刘世勇编写。

本书的出版得到了北京跟踪与通信技术研究所的大力支持。房鸿瑞研究员、杨永亮研究员、张国亭高级工程师、季刚、张彪和李蝉对本书提出了很多好的建议。在编写过程中与王宏、樊敏、石善斌和辛晓生等进行了很多有益的讨论。在此一并表示感谢!

由于作者水平有限,书中难免存在疏漏和错误之处,欢迎广大读者批评指正!也欢迎大家登录 STK 实验室网站(www.stklab.com.cn,网站上有与本书相关的电子版教材可供下载)与我们交流,我们会尽力答复读者朋友提出的每个问题。

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 STK 软件简介	1
1.2 涉及内容和有关说明	7
参考文献	8
第 2 章 STK 在航天任务中应用的基础知识	9
2.1 STK 定义的坐标系	9
2.2 STK 中的时间系统	12
2.2.1 航天任务中的常用时间系统	13
2.2.2 STK 中的时间系统格式	14
2.3 轨道外推	15
2.4 经典轨道根数	19
2.4.1 笛卡儿根数	19
2.4.2 开普勒根数	19
2.4.3 TLE 数据格式及轨道预报模型	25
2.5 太阳同步轨道卫星	27
2.5.1 太阳同步轨道的特性	27
2.5.2 利用 STK 仿真太阳同步轨道卫星	29
小结	38
参考文献	38

第3章 运载火箭仿真分析	39
3.1 运载火箭基础知识	39
3.2 利用外部文件输入运载火箭弹道和姿态	40
3.2.1 星历文件	41
3.2.2 姿态文件	47
3.3 创建发射坐标系	53
3.3.1 坐标系定义	53
3.3.2 坐标系旋转	54
3.4 创建运载火箭仿真场景	56
3.5 运载火箭测控性能分析	63
3.5.1 地面站对运载火箭的跟踪性能	63
3.5.2 天线安装角的变化范围仿真	67
小结	71
参考文献	72
第4章 月球探测卫星轨道仿真分析	73
4.1 月球探测卫星轨道设计简介	73
4.2 环绕地球飞行轨道仿真分析	76
4.2.1 环绕地球飞行轨道仿真	76
4.2.2 环绕地球飞行轨道测控性能分析	89
4.3 地月转移轨道仿真分析	97
4.3.1 地月转移轨道仿真	97
4.3.2 地月转移轨道段测控性能分析	104
4.4 环月轨道仿真分析	107
4.4.1 环月轨道仿真	107
4.4.2 环月轨道段测控性能分析	114
4.5 日凌期间 SEP 角计算	121

4.6	月食期间的光照条件分析	124
4.6.1	月食简介	124
4.6.2	月食期间的光照条件	125
4.6.3	地影和月影的三维图形显示	125
4.6.4	月影时间及月食期间的阴影计算	127
	小结	129
	参考文献	130
第5章	卫星姿态仿真分析	131
5.1	卫星飞行姿态简介	131
5.2	月球探测卫星姿态仿真	132
5.2.1	卫星姿态设置	132
5.2.2	利用三维图形显示卫星姿态	138
5.2.3	利用三维图形显示轨道面与太阳矢量的夹角	145
5.3	与姿态有关的测控性能分析	149
	小结	153
	参考文献	153
第6章	测控链路性能仿真分析	154
6.1	测控链路性能分析基础知识	154
6.2	STK/Communications 模块简介	156
6.3	利用外部文件生成天线方向性图	157
6.4	建立环月卫星测控链路性能分析的场景	160
6.5	测控链路性能分析	167
	小结	172
	参考文献	173
第7章	干扰性能仿真分析	174
7.1	抗干扰性能的基础知识	174

7.2	创建抗干扰性能分析的场景	177
7.3	干扰性能分析	184
	小结	189
	参考文献	190
第 8 章	深空探测器轨道仿真分析	191
8.1	金星快车探测器简介	191
8.1.1	金星快车探测器飞行轨道简介	191
8.1.2	金星快车探测器设计的特点	193
8.2	金星快车飞行轨道仿真	194
8.2.1	创建场景和三维图形窗口	194
8.2.2	巡航轨道仿真	196
8.2.3	环绕金星轨道仿真	201
8.3	测控性能分析	206
8.3.1	跟踪性能分析	206
8.3.2	太阳合对测控的影响	208
	小结	212
	参考文献	212
第 9 章	利用 STK/Matlab 接口实现复杂航天任务的仿真分析	213
9.1	复杂航天任务的仿真分析需求	213
9.2	STK/Matlab 接口简介	216
9.3.1	STK 与 Matlab 互联的设置和运行	216
9.2.2	接口函数概述	217
9.2.3	常用接口函数使用说明	221
9.3	基于 STK/Matlab 接口的仿真分析算例	227
9.3.1	星座对地观测特性分析	227
9.3.2	交会对接目标飞行器调相轨道特性分析	231

9.3.3	交会对接飞船远距离导引精度分析	238
	小结	278
	参考文献	278
附录	术语和缩略语	279

第1章 概 论

STK (Satellite Tool Kit) 软件是在航天工业领域处于领先地位的商业分析软件,具有强大的分析、图形支持和数据输出功能,在航天领域得到广泛的应用。

近年来,我国航天事业取得了辉煌的成就,同时也面临难得的发展机遇,对航天任务进行分析和设计的需求也越来越多,越来越深入,STK 软件为满足我国航天任务的分析和设计需求提供了有力的技术支持。

本书主要以月球探测卫星测控性能分析为背景,研究 STK 在航天任务中的仿真和分析,下面简要介绍 STK 软件并说明全书涉及的主要内容。

1.1 STK 软件简介^[1]

STK 是 Analytical Graphics, Inc. (AGI) 公司开发的系统分析软件,它支持在复杂集成的陆、海、空、天场景下进行任务分析、规划、设计、操作以及事后分析的功能。AGI 公司的三个创始人 Paul Graziani、Scott Reynolds 和 Jim Poland 于 1989 年离开通用电气 (General Electric, GE) 航天部门后成立 AGI 公司并开发了 STK 软件,公司总部位于美国的宾夕法尼亚州^[2]。

STK 是一个经过任务验证的软件,主要应用于航天任务、虚拟航天、自动化指挥系统 (C⁴ ISR)、无人驾驶飞机 (Unmanned Aerial Vehicle, UAV)、导弹防御和电子系统的建模、工程化和操作。STK 平台是一个通用的建模和分析平台,适用于所有类型的航天、防御或智能系统。它利用了 AGI 公司已经申请专利的航天动力学引擎和集成的可视化技术,因此功能非常强大。同时,就其基本功能而言,STK 满足概念开发和初步系统 (或任务) 设计的大部分要求。

STK 具有以下特点:

- (1) 用于创建详细模型和仿真的用户界面非常直观。
- (2) 具备大量的数据输出参数。
- (3) 不仅包括大量的标准输出报告和图形,而且允许用户自定义报告和图形类型。

STK 功能强大的原因在于:

- (1) 在时域和空域的专业分析方面具有极高的准确性。
- (2) 高度集成的三维可视化。
- (3) 产品支持人员由专业的工程师和软件开发人员组成。

STK 主要应用于以下 5 个领域。

(1) 航天任务。AGI 提供现成的商用软件用于支持航天任务整个周期内的仿真,为设计工程师、系统集成商和任务操作者提供工具箱以极大地提高航天任务设计和操作领域工作的速度、准确度和效率。用户可以利用应用、引擎或组件等多种形式的技术实现以下功能:开发和研究航天任务概念;设计、分析和优化航天系统;为确定航天任务状态、保护航天设施以及维持可靠的航天操作提供有力的保障。

(2) C⁴ISR。STK 提供的系列软件模块允许用户快速响应战争要求。STK 专门为 C⁴ISR 的概念开发、工程化和数据分析进行设计,因此在任务背景下的专业计算和动态可视化方面具有优势。STK 可用来完成以下功能:开发下一代的作战概念(Concept of Operations, CONOPs);对提出的结构进行快速建模;设计、优化和测试 C⁴ISR 软件系统;模拟情报、监视和侦察(Intelligence, Surveillance and Reconnaissance, ISR)任务并训练操作者;为任务关键需求提供准确的答案。

(3) 无人驾驶飞机和航空器任务。STK 提供的系列软件模块允许用户快速响应 UAV 和航空器任务要求。STK 专门为 UAV 和航空器的概念开发、工程化和数据分析进行设计,因此在任务背景下的专业计算和动态可视化方面具有优势。STK 可用来完成以下功能:支持概念设计和系统描述;对提出的结构进行快速建模;设计和测试 UAV 系统;规划、优化和分析 UAV 任务;模拟 UAV 任务并训练操作者;分析任务。

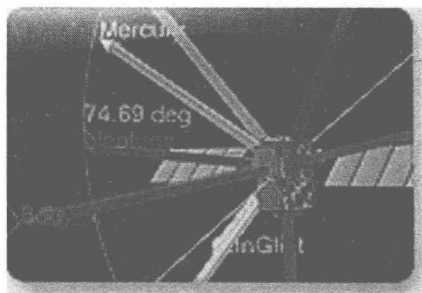
(4) 导弹防御。STK 允许用户快速评估防御系统的结构。STK 专门为导弹防御的概念开发、工程化和数据分析进行设计,因此在任务背景下

的专业计算和动态可视化方面具有优势。STK 可用来完成以下功能:分析威胁、探测设备和战斗;对集成化防御结构进行建模;增强当前的分析能力;开发定制的应用程序。

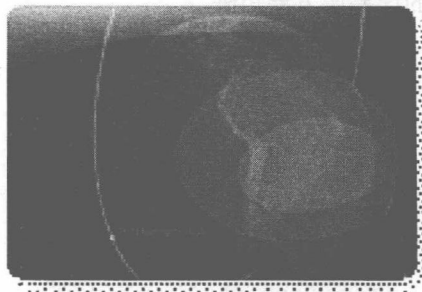
(5) 电子系统。STK 在综合任务环境下对无线通信和雷达性能进行建模,从而在整个任务层面上实现了准确的射频性能估算。电子系统(Electronic System, ES)和任务工程师、分析师和操作者能够利用 STK 完成以下功能:支持概念设计和系统描述;规划、优化和分析现场测试;评估集成任务结构;研究 ES 和非 ES 任务元件的折中;根据 ES 性能规划操作。

本书主要讨论 STK 在航天任务中的应用,后面将不再讨论 STK 在其他四个方面的应用。STK 应用于航天任务的主要特性如下。

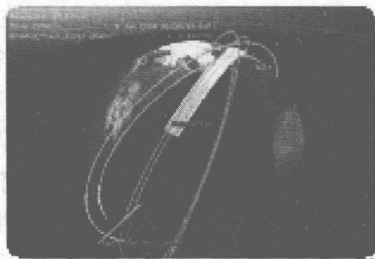
(1) 定制矢量几何:创建航天任务中任意的点、面、矢量、坐标轴或坐标系;利用定制的参考坐标系定义轨道根数;在任意坐标系下实现轨道的可视化。



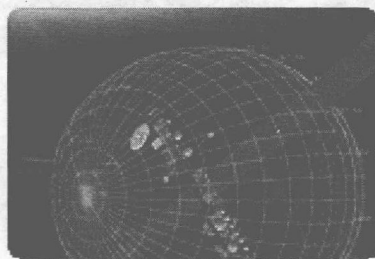
(2) 带有完整力模型的空间环境影响:引力场模型;大气阻力影响;辐射压(太阳等);三体效应;辐射流量和剂量影响;磁场模型;粒子和碎片撞击;航天器温度。



(3) 轨道、弹道设计和变轨策略: 发射窗口分析; 近地轨道、中高轨道、同步轨道、月球轨道和行星际轨道设计; 弹道设计和优化; 轨道维持、长期管理和轨道修正变轨; 编队飞行、交会对接和邻近操作; 飞越、捕获、下降和着陆变轨。



(4) 姿态建模: 对多个时间段的航天器姿态建模; 根据自定义的坐标系确定方向; 仿真引力、太阳辐射压和大气阻力等摄动力对航天器姿态的影响; 包括姿态仿真器插件。



(5) 接近分析: 对跟踪的空间目标进行潜在的接近分析以对其进行碰撞评估和消除; 快速处理和外推大量的目标跟踪; 从轨道确定工具包 (ODTK) 导入实际的误差协方差矩阵。

