

Application of STK in System
Design and Mission Analysis for Spacecraft

应用STK 实现空间飞行器 总体设计及任务分析

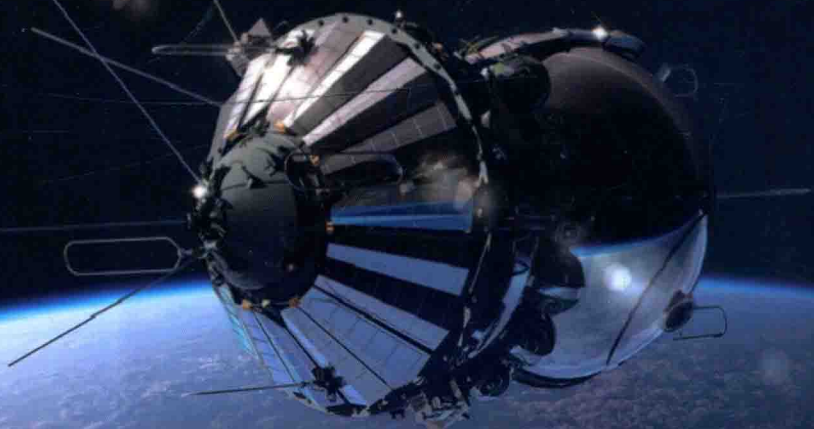
闻新 张业鑫 著

零起点

介绍STK软件应用，循序渐进介绍STK设计平台，直观实现航天器任务分析

通过航天器、星座、编队和集群等案例的STK分析过程，启发读者利用STK软件进行创新设计

前置航天器系统总体组成、轨道设计基础知识，无需参考其他书籍资料



國防工業出版社

National Defense Industry Press

应用 STK 实现空间飞行器 总体设计及任务分析

闻 新 张业鑫 著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书致力于让读者在空间飞行器总体设计、新概念航天器和 STK 软件工具应用三个方面有所收获,重点介绍航天器总体设计及其应用 STK 进行任务分析等。本书共分三大部分:空间飞行器总体设计、STK 软件使用入门和 STK 在航天任务分析中的应用。主要内容包括:空间飞行器设计概要、航天器飞行轨道基础、新概念航天器、STK 软件入门、STK 系统建模和任务分析、STK 在航天器群中的应用等。

本书是作者在多年指导研究生、大学本科生工作基础上,参考了国内外本领域许多专家的研究成果,精心撰写的一部关于航天器任务分析与 STK 基础及其应用的著作。本书既适合对 STK 软件不熟悉的读者作为 STK 软件的入门读物,也适合对 STK 软件有一定基础的读者作为 STK 软件应用实例的参考书使用,愿读者能够通过本书的阅读,掌握 STK 工具软件及其应用,为我国航天事业发展做出贡献。

本书可供航空航天、计算机仿真、电子信息、信息化管理和系统工程等各专业高校学生作为学习用书,同时也可供从事系统决策、情报分析、项目论证以及其他专业技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

应用 STK 实现空间飞行器总体设计及任务分析/闻新,张业鑫编著.

—北京:国防工业出版社,2016.3

ISBN 978-7-118-10800-2

I. ①应… II. ①闻… ②张… III. ①计算机仿真—应用—航天器—设计—研究 IV. ①V411.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 042852 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)

三河市众誉天成印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 13 $\frac{3}{4}$ 字数 312 千字

2016 年 3 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 39.00 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

前 言

空间飞行器设计是在火箭技术的基础上,为实现太空飞行,综合利用现代先进的科学技术成果而发展起来的。“空间飞行器总体设计”也称为“航天器系统工程”。航天器系统工程是一项多学科多专业、交叉与综合的系统工程技术,在航天器研制和应用中占有重要地位,其技术水平不但对提高航天器总体水平、缩短研制周期、节省研制经费起着重要作用,而且直接关系到航天器系统性能及其系统技术指标的先进性、可靠性、安全性和航天器在轨工作寿命。

空间飞行器设计的工具软件 STK 在商业、政府和军事任务中发挥着越来越重要的作用,STK 可以给出精确的分析结果,其逼真的场景仿真获得了众多专家认可,其应用领域也在不断扩大,涵盖了空间飞行器设计和操作、通信、导航、遥感、战略和战术防御、战场管理和科学研究等多个领域,成为航天及其相关领域最有影响力的软件之一。

国内 STK 应用情况不断增加,近几年来国内学生对外交流不断增加,通过各种渠道拥有 STK 软件的用户也在逐渐扩大,很多高校都在建立航空航天专业。与此同时 STK 应用也在从航空航天专业向外扩张应用,最近推出的 STK 版本,已经改为“系统工程软件包”。由此可见,未来 STK 将在中国各个领域广泛应用。

本书系统性强,涉及到的内容包括航天器总体设计、最新航天器设计成果介绍、STK 软件入门、STK 应用与分析。本书有四大特点:

- (1) 通俗地介绍了空间飞行器总体设计过程,从一个总体指标分析了诸多航天器总体设计问题;
- (2) 综合了国外最新的航天器设计成果,采用图解的形式对其进行介绍与分析;
- (3) 由浅入深地介绍了应用 STK 的设计步骤;
- (4) 嵌入一些航天器群任务分析,并且是建立在 STK 10.0 版本基础上的应用分析案例。

本书第 1 章、第 2 章、第 4 章、第 5 章、第 6 章和第 7 章由闻新撰写,第 3 章、第 8 章、第 9 章和第 10 章由张业鑫撰写,最后由闻新统稿、张业鑫校稿。

对本书做出贡献的还有刘江凯、施若馨、李佩冉、连晓斌、温楚楚、鲁鹏、王

嘉轶等。

本书撰写过程中，学生们参阅了丁溯泉和张波等撰写的《STK 在航天任务仿真分析中的应用》。本书出版还得到了国防工业出版社的大力支持，再此表示深深的感谢。

由于在撰写过程中时间紧张，没有比较成熟的模式可以借鉴，书中不妥之处恳请读者批评指正，欢迎提出宝贵意见。

作者

2016 年 1 月 于上海

目 录

第一篇 空间飞行器总体设计

第 1 章 人类飞天历程回眸	2
1.1 早期火箭	2
1.2 航天的理论基础	4
1.3 现代航天先驱	6
1.4 第二次世界大战的航天	8
1.5 进入航天时代	9
1.6 轨道器和探测器	15
1.7 航天进入商业的新时代	17
第 2 章 空间飞行器总体设计概述	20
2.1 空间飞行器总体设计	20
2.2 空间飞行器总体设计的内容	20
2.3 从飞行任务角度认识载荷	21
2.3.1 载荷的种类	21
2.3.2 载荷的地位	21
2.3.3 载荷的输出	22
2.4 认识航天大系统	22
2.5 空间飞行器总体设计概念	23
2.6 空间飞行器的设计过程	25
2.7 空间飞行器工程的最终设计极限	26
2.8 从航天器飞行时间角度看航天器总体设计	27
2.8.1 飞往金星需要多长时间	27
2.8.2 飞往月球需要多长时间	29
2.8.3 飞往冥王星需要多长时间	33
2.8.4 飞往木星需要多长时间	34
2.8.5 飞往土星需要多长时间	36
第 3 章 空间飞行器轨道分析	38
3.1 开普勒二体问题	38

3.2 典型轨道分析	42
3.2.1 圆轨道 ($e=0$)	42
3.2.2 椭圆轨道 ($0<e<1$)	43
3.2.3 抛物线轨道 ($e=1$)	46
3.2.4 双曲线轨道 ($e>1$)	48
3.3 轨道机动	50
3.3.1 脉冲机动	50
3.3.2 霍曼转移	51
3.3.3 双椭圆霍曼转移	52
3.3.4 调相机动	53
3.3.5 共拱线非霍曼转移	54
第4章 了解新概念航天器的发展	57
4.1 基于纳型卫星组成的“天基镜群”	57
4.1.1 基于航天器群建立的“天基镜群”	57
4.1.2 “天基镜群”的性能分析	59
4.1.3 应用价值分析	60
4.2 飞星星群的关键技术与应用分析	60
4.2.1 飞卫星的概念	60
4.2.2 100g 级飞卫星的功能性设计	61
4.2.3 星群 GN&C 策略设计	63
4.2.4 合成孔径应用分析	64
4.2.5 应用价值与前景	66
4.3 一种可以装进衣兜的微小航天器	66
4.3.1 未来航天器及其应用	66
4.3.2 未来深空探索任务的瓶颈之一	67
4.3.3 基于仿生的微型推进器	68
4.3.4 微射流电推进器的工作原理	69
4.3.5 微推进器的应用	70
4.4 气体行星漂浮探测器	70
4.4.1 各种行星探测器	70
4.4.2 漂浮机器人	70
4.4.3 不同于以往的木星探测器	71
4.4.4 从大自然中获得灵感	71
4.4.5 未来的关键技术	72
4.5 未来五种太空任务设想	72
4.5.1 漂浮在金星云层的世界里	73
4.5.2 生活在土卫六的海洋里	73
4.5.3 行走在木卫二的冰层下	74

4.5.4 捕获小行星	74
4.5.5 星际旅游	75

第二篇 认识与使用 STK

第 5 章 建立复杂系统模型	78
5.1 创建新场景	78
5.2 STK 工作区	80
5.2.1 STK 工作区的组成	80
5.2.2 操控与认识 STK 工作区	80
5.3 插入和配置 STK 对象	82
5.4 3D 对象的编辑	86
5.4.1 STK 3D 对象编辑工具栏	86
5.4.2 3D 对象编辑工具	86
5.5 自己动手完成一些例子	87
5.5.1 题目一	87
5.5.2 题目二	89
5.5.3 题目三	89
第 6 章 任务分析仿真	91
6.1 对象属性	91
6.1.1 属性定义介绍	91
6.1.2 修改对象的属性	91
6.2 简单访问	94
6.2.1 什么是访问	94
6.2.2 地面位置的访问计算	94
6.3 报告和图形管理器的应用	98
6.3.1 报告和图形	98
6.3.2 保存自定义制报告或图表作为快速报告或图表	100
6.4 自己动手完成一些例子	102
6.4.1 题目一	102
6.4.2 题目二	106
第 7 章 扩展 STK 功能和工作分享	108
7.1 扩展 STK 功能	108
7.1.1 “Object Model” 模型和 “Connect” 模块	108
7.1.2 例子	108
7.2 工作分享	112

7.2.1 另存 VDF 场景文档	112
7.2.2 电影时间轴线工具	115

第三篇 应用 STK 的航天任务分析

第 8 章 应用 STK 的探月卫星编队任务的设计与分析	120
8.1 探月卫星编队轨道设计简介	120
8.2 绕地飞行轨道设计分析	121
8.3 地月转移轨道仿真分析	131
8.4 绕月轨道仿真分析	135
第 9 章 STK 在星座设计与分析中的应用	143
9.1 星座设计理论	143
9.2 星座性能评价	144
9.3 典型星座仿真与分析	144
9.3.1 全球星 (Global Star)	144
9.3.2 铱星 (Iridium) 星座仿真分析	145
9.3.3 “闪电”轨道卫星 (Molniya) 仿真分析	146
9.3.4 北斗/GPS 联合导航星座仿真分析	148
9.4 卫星星座设计及其覆盖性能分析	152
9.4.1 星座设计参数影响分析	152
9.4.2 仿真实例分析	153
第 10 章 STK 在卫星编队设计与分析中的应用	172
10.1 卫星编队飞行	172
10.2 典型编队的性能仿真分析	173
10.2.1 Techsat-21 编队设想	173
10.2.2 TanDEM-X 项目	174
10.2.3 GRACE 项目	175
10.3 小卫星编队队形设计	177
10.3.1 约定与假设条件	177
10.3.2 坐标系定义	177
10.3.3 Hill 方程简化	178
10.4 基于 STK 的编队设计与仿真模型	179
10.5 小卫星编队设计与仿真	183
10.5.1 同面绕飞编队设计	183
10.5.2 异面绕飞编队设计	184
10.6 卫星编队在轨协同管理仿真演示	185

10.6.1 任务行为规划及建模.....	186
10.6.2 STK 场景设计	189
10.6.3 MATLAB 数值仿真及 STK 效果演示	191
附录 第 10 章仿真对应代码	195
参考文献	209

第一篇

空间飞行器总体设计

第1章 人类飞天历程回眸

1.1 早期火箭

阿契塔 (ARchytas) (公元前 428—前 347 年), 希腊哲学家、数学家、天文学家 (图 1.1)。据说他制作并试飞了一个由蒸汽或压缩空气推动的外型酷似的小鸟装置。这只“小鸟”用绳子悬挂在一根长杆的末端, 并绕着这个长杆转动。这是有最早记录的第一个使用火箭作为推进器的装置。



图 1.1 阿契塔肖像

亚历山大里亚的 Hero (公元 10—前 70 年) (古希腊数学家) 发明了一种蒸汽发动机, 虽然不是火箭, 但却运用了火箭的推进器原理。目前关于蒸汽发动机的准确信息早已无迹可寻, 只知道它是一种铜容器, 其底部可以被火加热, 进而获取动力。容器中的水加热成为蒸汽, 从球体引出的两根 L 形管高速喷出, 导致球体沿着与喷气相反的方向快速转动 (图 1.2)。当时这种蒸汽发动机应用于玩具, 经过长达一千多年之后, 人们才开始意识到它的价值。



图 1.2 运用火箭推进器原理制造的蒸汽发动机

火药的最早起源至今仍是个迷，但据有关资料显示，早在公元 1 世纪中国就有了它的雏形。由硝石、硫磺和木炭按一定比例混合成的粉末在点燃时，会产生色彩缤纷的火花和烟，中国人用这种粉末制作爆竹。将竹子和毛皮做的管子一端封闭，里面装满火药，并采用特定的开口形状和粉末封装方式，当粉末被点燃时就会产生火花和爆炸。爆竹在开口端处急速喷出气体产生推力，在推力的作用下会在天空飞掠而过，火箭就这样诞生了。到 1232 年，这些原始的火箭已经被附着在弓箭的箭头上当作武器，在汴京之战中用于击退蒙古侵略者（图 1.3）。



图 1.3 中国古代的火箭

罗杰·培根（Roger Bacon）（1214—1292 年）是一名修士（图 1.4），他在 “*The Epistola Fratrisc. Baconis, de secretis operibus artis et naturae et nullitatem magia*” 中提到火药 “我们可以用硝石等物质，发射到远距离，引发大火……仅仅使用非常小量的这种物质就可以制造出强烈的火光，并伴随着可怕的声响，使用它也许可以摧毁一座城市或一支军队……”

培根改进了火药配方，大大地增强了混合物粉末的威力。

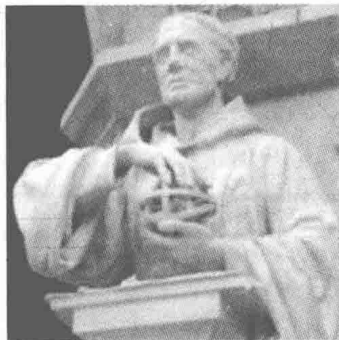


图 1.4 培根肖像

万户是中国明朝中叶的一名官吏和占星师，他一直梦想飞天。为此，他制作了一把椅子，在底部绑上了 47 支火药鞭炮，并在他的椅子上安装了风筝作为翅膀（图 1.5）。在发射当天，47 名助手冲过来，同时点燃所有火药鞭炮的导火线，紧随其后的是巨大的爆炸声，当烟雾散尽以后，万户不见了。有人认为万户成功地进入了宇宙，并成为 “月亮里面的人”。但不论结果怎样，万户成为世界上公认的第一个尝试利用火箭飞天的英雄。



图 1.5 万户飞天梦

数百年来，火箭和大炮争相成为战争的武器，每次技术进步都会使这些武器性能不断的改善。大炮射击更精确，火箭发射更迅速，火箭的攻击范围也变宽了，而且各种各样的应用不断出现。公元 1420 年，意大利的会士丰塔纳发明了在水面运行的火箭鱼雷，可以用来点燃敌舰（图 1.6）。

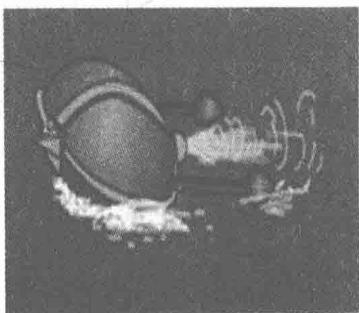


图 1.6 火箭鱼雷

卡齐米日·希敏诺维奇（Kazimierz Siemienowicz）（1600—1651 年），波兰皇家炮兵部队的波兰立陶宛联邦指挥官，一名火炮和火箭领域的专家（图 1.7）。他写了一份关于火箭的手稿，在他去世之前有一部分曾被刊登，并且在“*Artis Magnae Artilleriae pars prima*”一书中推导出了多级火箭的设计，日后成为了向外太空发射火箭的基础技术。希敏诺维奇还提出了使用电池推进火箭以及用三角翼稳定器取代当前火箭使用的导向杆的思路。后来，戈达德的成就则是建立在诺维奇的工作成果基础之上。



图 1.7 希敏诺维奇以及他的火箭发明

1.2 航天的理论基础

除在其他领域的许多成就之外，伽利略·伽利莱（Galileo Galilei）（1564—1642 年）

这个意大利天文学家和数学家（图 1.8）重新点燃了科学实验的火炬，质疑了有关质量和引力的旧观念，并且证明了物体的运动不需要持续施加外力维持。他称物体抵抗速度变化的这种性质为“惯性”。惯性作为基本性质之一，之后被牛顿纳入三大运动定律之中。



图 1.8 伽利略肖像

英国科学家牛顿（Newton）（1642—1727 年）（图 1.9）把所有的运动科学凝练成了三条简洁的科学定律。他的定律被发表在“*Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*”中，为现代航天科学奠定了基础。



图 1.9 牛顿肖像

在印度用蕴含巨大能量的“替浦苏丹”火箭弹对英国发动惊人的火箭弹袭击后，威廉·康格里夫（Colonel William Congreve）（1772—1828 年）接管了英国的军方火箭公司。他的一些火箭设计射击范围达到了 5500m。他还创造了可以向敌军投射卡宾枪球的炮弹火箭和用于燃烧船只和建筑物的燃烧弹火箭，并发明了从船舶上发射的火箭（图 1.10）。1812 年战争期间，法兰西斯·史考特·凯伊创造的短语“by the rocket’s red glare”就是指英国发射的康格里夫火箭。

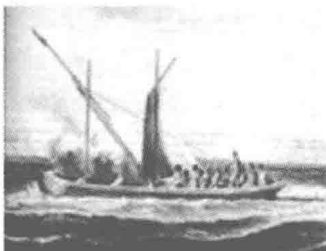


图 1.10 船载火箭

遨游太空的梦想被法国的科幻小说家儒勒·凡尔纳（Jules Verne）（1828—1905 年）带入了人们的生活之中。在他的《从地球到月球》一书中，他用一个巨型大炮把载人炮弹射到月球上。虽说不是火箭，却与后来的阿波罗登月计划有一些有趣的相似之处。这枚炮弹称为哥伦比亚炮，有三名船员，从佛罗里达州向月球发射（图 1.11）。所以，“阿波罗 11 号”也命名为哥伦比亚，有三名宇航员，从佛罗里达州卡纳维拉尔角发射场发射。凡尔纳准确描述了宇航员在他们航行过程中是如何感到“失重”的。当然，实际上在大炮发射的初始加速度下，宇航员们根本不会幸存。但无论如何，凡尔纳也是早期太空思维的开拓者，激发了许多未来的火箭专家和航天人的想象力。



图 1.11 凡尔纳描述的科幻世界

1.3 现代航天先驱

康斯坦丁·齐奥尔科夫斯基（1857—1935 年）是一名教师、理论家、航天先驱（图 1.12），他是移民到俄罗斯的波兰林务官的儿子。他撰写了大量有关太空旅行的知识，被认为是宇宙航行和载人航天之父。他倡导液体火箭发动机、太阳能、轨道空间站和星际飞行。他最著名的研究成果“*Research into Interplanetary Space by Means of Rocket Power*”在 1903 年发表。同年莱特兄弟将他的理论应用于控制飞机的飞行。他基于牛顿第二运动定律，在火箭发动机排气速度与飞行器飞行速度之间建立了著名的火箭方程。



图 1.12 齐奥尔科夫斯基肖像

美国科学家，也称为“现代火箭之父”，罗伯特·戈达德（1882—1945 年）研制并于 1926 年 3 月 16 日试飞成功了世界上第一个液体燃料推进剂火箭（图 1.13）。尽管它的飞行并没有给人们留下深刻的印象（只爬升了 12.5m），却是 43 年后“土星 5 号”探月火箭的前身。在当地居民的要求下，他将实验地点从马萨诸塞州的奥本搬到了墨西哥州罗斯威尔附近的沙漠里。在那里，他继续实验，并研发了陀螺仪系统来控制飞行中的火箭，设计了有效载荷舱和降落伞回收系统。



图 1.13 戈达德实验图

赫尔曼·奥伯特（1894—1989 年），出生于罗马尼亚，后入籍德国（图 1.14）。痴迷于儒勒·凡尔纳的作品，并毕生致力于推进太空航行的研究。他向德国海德堡大学提交的论文被认为太不切实际而被拒绝，却为他的著作“*Die Rakete zu den Planetenräumen*”奠定了基础。本书解释了航天飞行的数学原理，提出了实用的火箭和空间站设计，启发了一代火箭研究者，研究火箭的组织在世界各地相继涌现出来，包括主导研发出 V2 导弹的佩内明德研究基地。



图 1.14 奥伯特肖像

在 20 世纪二三十年代，业余火箭研究者们和世界范围内的科学家都致力于把火箭应用于飞机、赛车、游艇、带有翅膀的自行车、沉船抢救水手的掷线、充当离岸岛屿的邮递车和其他所有他们能够想到的事情（图 1.15）。尽管大多都失败了，但这些经历却告诉了实验者们如何让自己的火箭更加有效、更加可靠。