

基于 SOSIM 体系仿真平台的通用卫星平台模型设计

武小平, 李梦阳, 史莲子, 罗汝斌

(北京宇航系统工程研究所, 北京 100074)

摘要: 针对体系仿真平台实现对卫星研究及仿真模拟的需求, 基于自主研发 SOSIM 体系仿真平台对通用卫星平台模型构建方法进行研究, 提出了卫星模型轨道外推计算、视场探测、星间连线等仿真模型算法, 开展了 Walker 三种构型星座设计, 形成体系仿真平台卫星模型仿真和巨型星座生成能力, 为开展卫星轨道运行、星座生成与分析、探测与干扰、通信链路分析等仿真研究, 以及大规模场景下的卫星仿真推演提供有力支撑。

关键词: 体系仿真平台; 卫星仿真模型; 算法设计; 星座设计

Design of Universal Satellite Platform Model Based on the SOSIM System Simulation Platform

WU Xiaoping, LI Mengyang, SHI Lianzi, LUO Rubin

(Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100074, China)

Abstract: In order to meet the needs of satellite research and simulation in the system simulation platform, and based on the SOSIM system simulation platform independently, research on a constructing method for a general satellite platform model is conducted. this paper proposes algorithms for satellite model orbit extrapolation calculation, field of view detection, and inter-satellite link simulation, develops the Walker constellation design with three configurations, creates the capabilities of satellite model simulation and large constellation generation in the system simulation platform, and provides a powerful support for satellite orbit simulation, constellation generation and analysis, detection and interference, and communication link analysis, as well as large-scale satellite simulation and deduction.

Keywords: systems simulation platform; satellite platform model; algorithm design; constellation design

0 引言

日益多样化的体系研究需求, 使得体系仿真系统研制与运用呈现出日益复杂的趋势。未来体系研究中, 无往而不利的沙盘点兵、兵棋推演、论坛争辩, 愈发难以言明真实世界中的走势, 愈发难以用于辅助方案生成, 愈发难以预测体系演变方向。随着计算机技术、信息技术、网络技术、仿真技术蓬勃发展, 仿真在体系研究领域发挥越来越重要的作用, 体系仿真系统规模大、变化快等特点导致系统开发难度大, 因此需要一系列的工具、模型、数据作为基础进行研发, 这就涉及体系仿真平台。体系仿真平台是以行业相关规范为指导, 以仿真引擎为核心, 以体系对抗模型和数据为基础, 以支撑建模验模、资源管理、想定开发、实验规划、仿真运行、仿真评估等过程中涉及的工具为内容的集合, 体系仿真

平台作为仿真的工具, 可以作为体系研究、推演复盘、分析评估论证等的重要支撑手段^[1-8]。

国外研究仿真技术、研制仿真平台较早, 从 1990 年以来, 美军大力开展异构/异地互联的分布式综合仿真环境、虚拟战场训练等先进仿真技术研究, 形成了一系列仿真工具和支撑平台, 通过长期的使用和不断修正, 很多代表性平台功能已经较为完善, 得到的计算数据、结论具有较高的可信度^[9-15], 在众多体系仿真工具和支撑平台中, EADSIM 是世界上最成熟且广泛运用和验证的体系仿真平台, 其始终与仿真技术、体系运用的发展变化保持高度的一致和同步, 不断改进与完善, 因而至今仍是美军仿真系统的代表, 全球官方用户超过 300 家, 海湾战争期间, EADSIM 在“沙漠盾牌”和“沙漠风暴”作战计划的拟订和实施中得到了应用。近年来, AFSIM 仿真平台在国内出现频率较高, 它是美国政

收稿日期:2024-09-30; 修回日期:2024-10-16。

作者简介:武小平(1990-),男,硕士,工程师。

引用格式:武小平,李梦阳,史莲子,等. 基于 SOSIM 体系仿真平台的通用卫星平台模型设计[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(10):244-250, 258.

府主导的开源的军事仿真框架, 支持工程、交战、任务及战役 4 个层级的仿真应用, 其特点是软件开源、模型资源丰富、框架灵活、功能易于扩展、并注重开放分享, 目标是降低仿真开发、集成及后期维护的成本^[16]。

国内从 20 世纪 90 年代开始对仿真引擎、体系仿真平台及其应用进行研究, 已经建立一些相对完善的仿真系统及平台, 形成了一系列的技术成果和示范系统, 军队研究院所、军工企业和仿真公司都自主开发了仿真平台, 文献 [17] 中介绍的战役战术系列兵棋系统、文献 [18] 的 XSimStudio 仿真平台、文献 [19] 中的 SOSIM 体系仿真平台、文献 [20] 中的墨子联合作战推演系统等, 有效支撑了体系研究。其中 XSimStudio 是国内代表性的通用商业仿真平台, 在联合作战仿真领域有独特建树, 贯穿仿真系统的全生命周期过程, 在模型准备、方案拟定、系统运行、分析评估及态势展现各个阶段, 提供集成开发、运行管理和资源服务等全方位支持, 内置通用建模体系, 支持模型及应用软件的二次开发, 可为分析论证、模拟训练、试验评估等各领域各层级仿真系统的研制集成和运行管理提供一揽子解决方案。总体来说, 国内自主开发的体系仿真平台的扩展性和集成能力比较强, 基本上都实现了参数化和组件化, 是真正意义上的开发平台。

卫星仿真属于仿真中的一个重要业务领域, 可根据需求开展火箭发射及卫星入轨、卫星轨道运行与变轨机动、星座生成与分析、探测与干扰、通信链路分析、星载传感器成像模拟等研究。国内外对卫星仿真开展了很多研究, 文献 [21] 开展卫星星座的复杂覆盖研究, 提出了一种新的圆形轨道卫星星座设计理论; 文献 [22] 提出了 GPS 导航卫星仿真系统体系结构, 构建和分析了星座干扰误差和伪距信号观测量模型; 文献 [23] 提出了大型遥感卫星高精度姿态控制方法, 相较于飞轮前馈补偿的姿态稳定度提升了一个数量级; 文献 [24] 提出了一种卫星仿真元模型规范框架, 提高了模型的通用性和互操作性。卫星仿真领域有一系列经过算法校准的仿真平台, 卫星仿真平台一般和需要研究分析的业务紧密耦合, 用于分析具体的技术问题, 可以用来进行大型星座设计、卫星轨道设计、探测和通信定量分析、可视化展示等。

1 SOSIM 体系仿真平台

SOSIM 体系仿真平台是中国航天科技集团有限公司第一研究院体系平台系列产品, 源代码完全自主可控, 具有自主知识产权。SOSIM 是支持装备可视化建模、行为建模、离散事件仿真推演和态势综合显示的一体化仿真开发及运行调度平台, 采用高内聚、低耦合的分层体系架构, 能够支持单机运行、集中显控, 集中运

行、分布式显控, 分布式运行、分布式显控等多种运行模式, 提供了完整的仿真开发与应用环境、高效的仿真引擎和一系列支撑工具, 支持不同种类、不同层级的仿真模型快速接入, 贯穿体系仿真全生命周期, 基于工具集及模型体系进行高效便捷的分析论证、仿真推演与评估。

1.1 仿真平台架构

SOSIM 体系仿真平台基于分布式和虚拟化技术, 将前端、平台应用服务后端和底层引擎分离, 应用端、引擎端的各个拆分服务/模块相对独立, 面向接口设计和编程, 保证每个服务/模块相对独立, 按照关键程度进行分类管理, 除基础和核心服务两类外, 其他拓展服务模块采用松耦合插件式设计和实现, 能够进行相应的二次开发和替换; 基础和核心服务/模块设计和实现具备跨平台 (国产化操作系统、Windows、Linux) 能力, 平台以用户权限为管理核心, 能够通过可视化界面实现角色用户管理和数据权限功能, 保障用户间数据相对独立; 支持远程用户登陆浏览器操作, 无需部署, 在局域网内环境下能够远程访问; 后台可采用物理机、云平台或超算集群模式, 多个仿真计算应用之间可进行负载均衡, 可支持多用户、高并发服务。

平台架构分为基础设施层、基础资源层、基础服务层、应用服务层和平台功能层, 如图 1 所示。其中, 基础设施层为系统运行所要求的硬件基础设备; 基础资源层包括系统运行所需要的各类数据资源, 如基础信息数据库、地理环境数据、异构资源数据、数字模型数据、试验结果数据等; 基础服务层包含了应用所需的基础支撑服务, 将各核心功能划分为较小且相对独立的功能点, 每个功能点由一个独立的基础服务实现, 如平台管理服务、运行控制服务、体系设计基础服务、数据采集服务、联合中间件服务等; 业务服务层涵盖了体系设计、模型管理、仿真推演评估和态势显示等功能, 是业务功能的核心组成部分, 在平台应用过程中, 响应用户界面操作, 完成基础服务输入输出的处理; 平台功能层是仿真平台核心功能的入口, 由体系设计子平台、体系对抗仿真推演子平台、智能评估子平台、体系展演子平台组成。

1.2 仿真建模框架

仿真建模框架是沟通仿真模型和仿真平台的桥梁, SOSIM 体系仿真平台仿真建模框架是以面向对象建模思想为基础、以组件化建模技术为支撑, 将仿真建模与仿真平台解耦, 通过构建不同组件模型的方式组装形成实体模型并进行实例化, 从而提高仿真模型的复用性和扩展性。

1.2.1 模型开发工具

模型开发工具为建模人员提供可视化的集成开发环

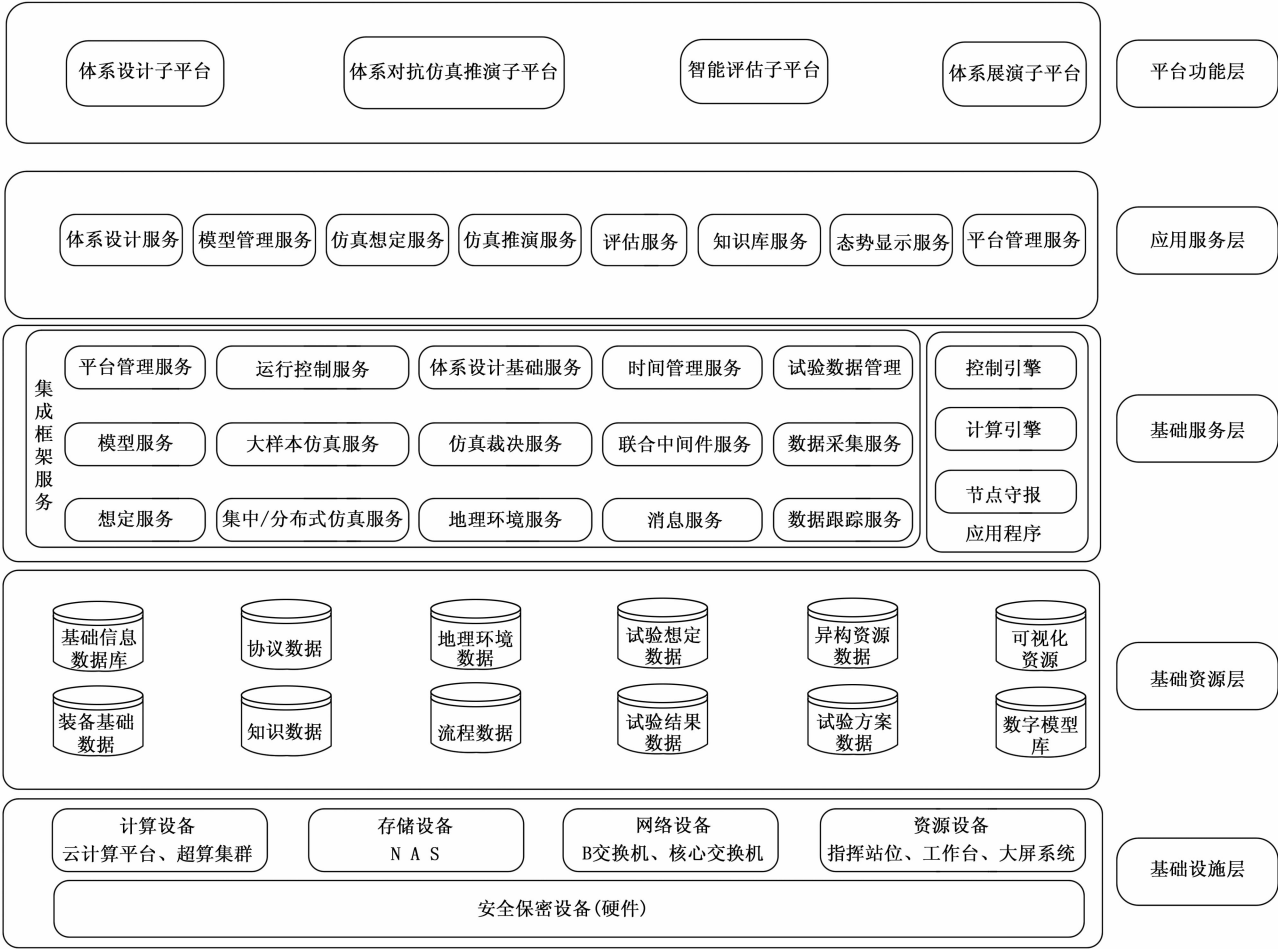


图 1 SOSIM 体系仿真平台架构图

境，为程序模型组件的开发提供统一的规范与工具，具备基类继承、模型定义、源代码编辑及参数编辑等功能，支持概念模型、数学逻辑模型的编辑，并自动生成满足模型库标准规范的新模型，模型开发软件支持不同需求下的各种模型的定义。模型包括平台模型和子系统模型，包括：平台组件、机动组件、传感器子系统、通信子系统、数据处理子系统及目标特征子系统等。

1.2.2 模型代码框架

SOSIM 体系仿真平台模型的基础代码框架包含 3 个文件，分别是：模型类头文件（.h），用于声明该模型的变量和方法；模型类初始化代码文件（Intf.cpp），用于实现模型的入口函数；模型类功能实现代码文件（.cpp），用于实现该模型方法。具体如表 1 所示。

1) 模型初始化：InitModel（）函数为模型初始化函数，在仿真准备阶段最先由仿真引擎调用，可支持模型开发者通过读取来自想定文件中的 json 字符串，将想定中的基本属性、配置参数和仿真任务等转换为本模型的初始化信息。

2) 仿真准备：PrepareStart（）函数为模型仿真准备函数，该函数在仿真准备阶段由引擎调用实现模型仿

真开始前的准备工作，可支持模型开发者在该函数中提交模型在仿真开始时刻需要执行的零时刻事件，同时仿真引擎将在此时同步所有仿真模型的基本属性、模型运行状态等初始化数据。

表 1 模型代码框架

文件类型	文件名	实现功能
头文件	模型名称.h	模型导入导出关键字定义
		相关头文件引用
		模型类定义(包括模型参数和方法)
	模型名称 Intf.cpp	模型类对象入口函数实现
源文件	模型名称.cpp	构造函数实现
		析构函数实现
		InitModel()初始化函数实现
		PrepareStart()模型仿真准备函数实现
		PostPrepareStart()模型后置仿真准备函数实现
		Cycle()步进函数实现
		OnTruthEvent()响应事件函数实现
		UpdateEntityData()实体信息更新函数实现
		模型其他业务功能函数实现

3) 后置仿真准备：PostPrepareStart（）函数为模

型后置仿真准备函数, 该函数在仿真准备阶段由引擎调用, 可支持模型开发者在该函数中再次提交零时刻事件, 一般用于获取其他模型的状态或属性, 该项不是必须项, 如果模型没有业务需求, 可直接跳过。

4) 步进仿真: Cycle () 函数为模型步进函数, 该函数在仿真运行阶段由引擎调用, 可支持模型开发者在该函数中实现模型需要按步长执行的功能, 如车辆机动、飞机飞行、传感器扫描等。

5) 响应仿真事件: OnTruthEvent () 函数为模型响应事件函数, 该函数在仿真运行阶段由引擎调用, 可支持模型开发者在该函数内实现响应各种事件并执行相关业务逻辑流程的功能, 如被杀伤、被干扰等;

6) 模型信息更新: UpdateEntityData () 为模型更新实体信息函数, 该函数在仿真运行过程中由引擎调用, 可支持模型开发者将模型需要更新的参数进行结构化写入, 用于分布式仿真场景下的模型数据交互。

1.3 模型测试流程

模型集成是数理计算模型向仿真模型形态转换的关键步骤, 主要由模型代码集成、模型上传及组合、想定部署及仿真任务测试和程序调试 4 部分组成。模型测试流程如图 2 所示。

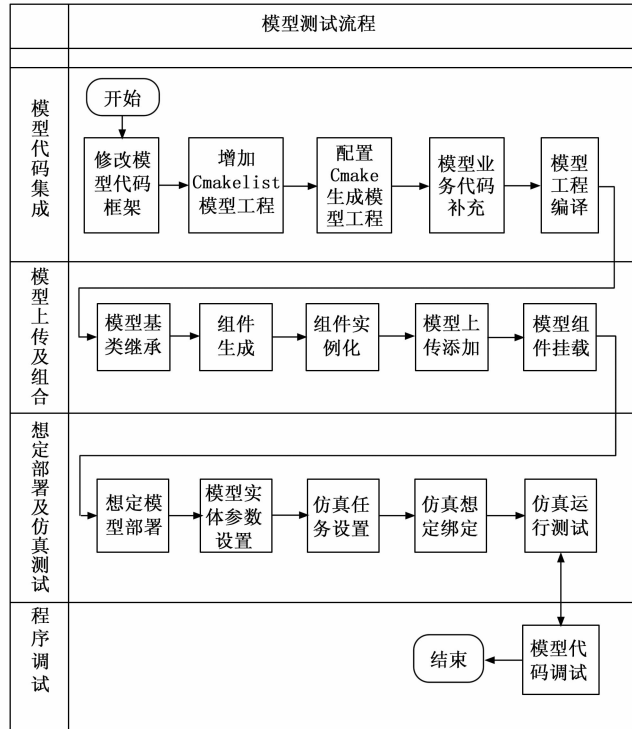


图 2 模型测试流程

1) 模型代码集成: 按照上节介绍的模型代码框架, 新建模型平台组件, 利用 Cmake 工具在模型资源库编译工程中增加模型项目, 完成模型业务代码集成及编译, 完成读取想定文件初始化、仿真准备、事件响应、固定步长推进等功能函数; 在模型编译库的代码环境下进行

编译, 生成模型动态库、静态库以及调试 pdb 等文件;

2) 模型上传及组合: 利用 SOSIM 体系仿真平台的模型开发工具, 通过基类继承、组件生成和组件实例化操作, 完成模型初始化参数赋值, 实现新建组件模型的上传, 然后利用模型组合工具, 实现新建实体模型的生成。

3) 想定部署及仿真任务测试: 利用 SOSIM 体系仿真平台的想定编辑工具, 完成新建实体模型的任务部署, 使用仿真任务管理工具生成基于新建想定的仿真任务并进行模型测试, 以验证新建实体模型功能流程的正确性。

4) 程序调试: 根据新建实体模型的程序调试需要, 将模型工程附加到进程进行调试, 以检验程序运行流程是否符合设计要求。

2 通用卫星平台仿真模型设计

2.1 仿真模型算法设计

通用卫星仿真模型在仿真时涉及卫星运行轨道外推、卫星视场锥交探测和卫星交互连线的模型仿真需求, 为此进行以下仿真模型算法设计。

2.1.1 卫星轨道外推计算

卫星在空间中实际运动时会受到各种环境作用力的作用, 根据航天器运动相关原理, 一般情况下, 卫星位置、速度为状态量的轨道动力学方程为:

$$\begin{cases} \dot{r} = v \\ \dot{v} = -\frac{\mu}{r^3}r + f \end{cases} \quad (1)$$

其中: v 为速度, f 为摄动加速度, 其主要由地球非球形摄动 f_a 、大气阻力摄动 f_D 、日月引力摄动 f_s 、太阳光压摄动 f_{SR} 及相对论效应摄动 f_{rel} 等构成。由于地球引力场模型中包含中心引力势, 故式 (1) 可表示为:

$$\begin{cases} \dot{r} = v \\ \dot{v} = f_{ub} + f_D + f_s + f_{SR} + f_{rel} \end{cases} \quad (2)$$

已知卫星初始位置速度的情况下, 采用 Runge-Kutta 数值方法对上述微分方程进行求解即可得到卫星轨道外推结果。

2.1.2 卫星探测视场锥计算

卫星探测视场一般可分为圆锥视场和矩形视场两种, 目前 SOSIM 体系仿真平台中卫星探测采用圆锥视场, 探测视场锥计算方法如图 3 所示。

由图 3 可知:

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{R+h}{R}\sin\theta\right) \quad (3)$$

其中: h 为卫星轨道高度, R 为地球半径, θ 为探测视场角的一半。

则 OS 和 OE 的夹角 β 为:

$$\beta = \pi - \alpha - \theta \quad (4)$$

流程如图 6 所示。

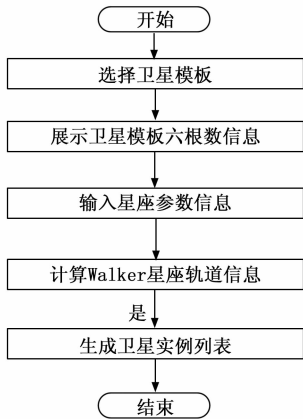


图 6 Walker 星座生成执行流程图

2.2.1 Walker-Custom 星座构型设计

一般来说，使用 (W, X, Y) 构型码来描述一个 Walker 星座的相对几何结构，这里的 W 表示星座中的卫星总数， X 表示星座的轨道面数， Y 则是对相邻轨道面卫星相对角位的一种度量参数。Walker 星座的星座构型参数则由星座构型码、轨道高度 h 、轨道倾角 i 、升交点赤经 Ω 和相位角 u 共 7 个变量构成，星座中第 j 个轨道面上的第 k 颗卫星的轨道参数可用以下公式表示：

$$\begin{cases} a = a_0 \\ i = i_0 \\ e = e_0 \\ \omega = \omega_0 \\ \Omega_j = \Omega_0 + (j-1) \frac{360^\circ}{P} \\ f_{j,k} = f_0 + (j-1) \cdot F \cdot \frac{360^\circ}{T} + (k-1) \cdot \frac{360^\circ}{S} \end{cases} \quad (13)$$

其中： $a_0, i_0, e_0, \omega_0, \Omega_0$ 以及 f_0 均为基准星的轨道参数， $S = T/P$ 为每个轨道面内卫星数目， $\Omega \in (0, 360^\circ)$ ； $j = 1, 2, \dots, P$ ； $k = 1, 2, \dots, S$ 。

采用该星座构型模型进行构型设计时，不管多少卫星数量，仅需对以上 7 个变量进行设计即可。得到卫星设计参数后，可通过将其转换为地心赤道坐标系下的速度和位置，并在考虑相同的摄动力影响下进行轨道外推，即可得到该星座的运行轨道，相关转换关系可参考前文，基于 SOSIM 体系仿真平台构建的 Walker-Custom 星座设计界面如图 7 所示，生成星座构型如图 8 所示。

2.2.2 Walker-Delta 星座构型设计

Walker-Delta 星座是由轨道高度和倾角都一致的圆轨道卫星组成的均匀对称星座类型，其星座优势为，星座的相对几何结构能够保持不变，构型较为稳定。Walker-Delta 星座轨道状态可用以下公式表示：



图 7 SOSIM Walker-Custom 星座设计界面

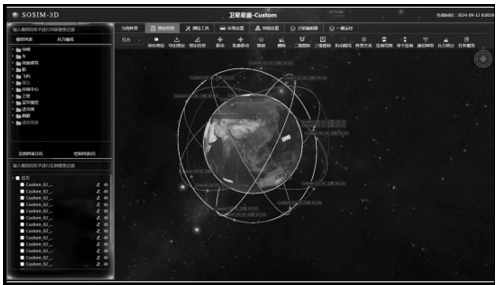


图 8 SOSIM Walker-Custom 星座构型图

$$\begin{cases} a = a_0 \\ i = 0 \\ e = e_0 \\ \omega = 0 \\ \Omega_j = \Omega_0 + (j-1) \frac{360^\circ}{P} \\ f_{j,k} = f_0 + (j-1) \cdot F \cdot \frac{360^\circ}{T} + (k-1) \cdot \frac{360^\circ}{S} \end{cases} \quad (14)$$

其中： a_0, e_0, Ω_0 以及 f_0 均为基准星的轨道参数， $S = T/P$ 为每个轨道面内卫星数目， $\Omega \in (0, 180^\circ)$ ； $j = 1, 2, \dots, P$ ； $k = 1, 2, \dots, S$ 。

采用 Walker-Delta 星座构型模型进行构型设计时，不管多少卫星数量，仅需对以上 7 个变量进行设计即可。得到卫星设计参数后，可通过将其转换为地心赤道坐标系下的速度和位置，并在考虑相同的摄动力影响下进行轨道外推，即可得到该星座的运行轨道，相关转换关系可参考前文。基于 SOSIM 体系仿真平台构建的 Walker-Delta 星座设计界面如图 9 所示，生成星座构型如图 10 所示。



图 9 SOSIM Walker-Delta 星座设计界面

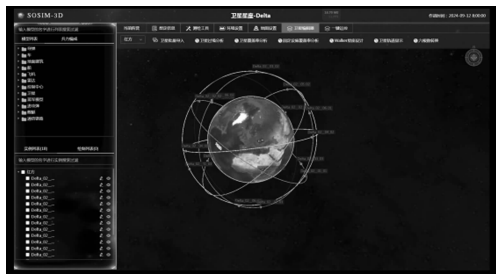


图 10 SOSIM Walker-Delta 星座构型图

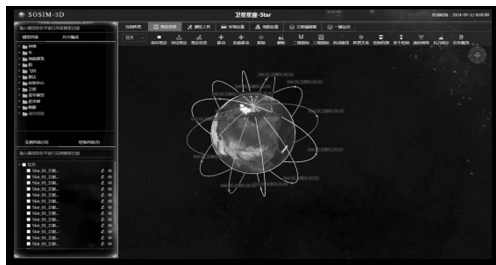


图 12 SOSIM Walker-Star 星座构型图

2.2.3 Walker-Star 星座构型设计

Walker-Star 星座是由轨道高度一致且倾斜角固定为 90 度的极轨道卫星所组成的均匀对称星座, 其具有覆盖范围广、观测连续性好的优点, 能够实现全球覆盖和对极地地区的连续观测, Walker-Star 星座轨道状态可用以下公式表示:

$$\begin{cases} a = a_0 \\ i = 90^\circ \\ e = e_0 \\ \omega = 0 \\ \Omega_j = \Omega_0 + (j-1) \frac{360^\circ}{P} \\ f_{j,k} = f_0 + (j-1) \cdot F \cdot \frac{360^\circ}{T} + (k-1) \cdot \frac{360^\circ}{S} \end{cases} \quad (15)$$

其中: a_0 、 e_0 、 Ω_0 以及 f_0 均为基准星的轨道参数, $S = T/P$ 为每个轨道面内卫星数目, $\Omega \in (0, 180^\circ)$; $j = 1, 2, \dots, P$; $k = 1, 2, \dots, S$ 。

当运用 Walker-Star 星座构型模型来进行星座构型设计时, 通过对上述参数进行配置, 便能够快速生成不同构型下的大规模卫星数量星座, 得到卫星设计参数后, 可通过将其转换为地心赤道坐标系下的速度和位置, 并在考虑相同的摄动力影响下进行轨道外推, 即可得到该星座的运行轨道, 基于 SOSIM 体系仿真平台构建的 Walker-Star 星座设计界面如图 11 所示, 生成星座构型如图 12 所示。



图 11 SOSIM Walker-Star 星座设计界面

3 结束语

本文基于 SOSIM 体系仿真平台对通用卫星平台模型进行构建, 提出了卫星模型轨道外推计算、视场探

测、星间连线等仿真模型算法, 开展了 Walker-Custom、Walker-Delta、Walker-Star 三种构型星座设计, 构建了 Walker 星座生成模块, 在 SOSIM 体系仿真平台中形成了巨型星座生成能力, 为大规模场景下的卫星仿真推演与信息交互提供有力支撑。

参考文献:

- [1] 黄晓东, 谢孔树, 李 妮, 等. 面向体系对抗的仿真支撑平台及应用 [J]. 系统仿真学报, 2021, 33 (8): 1914-1926.
- [2] 王俊达, 卿杜政. 柔性可扩展装备体系对抗仿真建模框架研究 [J]. 现代防御技术, 2020, 48 (4): 122-131.
- [3] 张灏龙, 谢 平, 赵 院, 等. 体系对抗仿真面临的挑战与关键技术研究 [J]. 计算机仿真, 2019, 36 (5): 1-5.
- [4] 陆志沣, 洪泽华, 张 励, 等. 武器装备体系对抗仿真计算研究 [J]. 上海航天, 2019, 36 (4): 42-50.
- [5] 李玉萍, 毛少杰, 居真奇, 等. 装备体系分析仿真平台研究 [J]. 系统仿真学报, 2019, 31 (11): 2374-2381.
- [6] 徐享忠, 于永涛, 刘永红. 系统仿真 (第 2 版) [M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- [7] 黄建鑫. 基于 ABMS 的体系效能仿真评估方法研究 [M]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.
- [8] 金伟新. 大型仿真系统 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [9] 王 赞, 蔡 帆. 国外武器装备体系仿真技术综述 [J]. 兵工自动化, 2015, 34 (7): 15-20.
- [10] 冯伟强, 严宗睿. 美军作战仿真系统建设发展及启示 [J]. 指挥控制与仿真, 2018, 40 (5): 137-139.
- [11] WANG W G, XU Y P, CHEN X, et al. High level architecture evolved modular federation object model [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2009, 20 (3): 625-635.
- [12] 唐 忠, 魏雁飞, 薛永奎. 美军 EADSIM 仿真系统机理与应用分析 [J]. 航天电子对抗, 2015, 31 (3): 25-29.
- [13] 常 非. 美军主要推演和仿真系统模型体系与建模机制研究 [J]. 军事运筹与系统工程, 2015, 29 (2): 75-80.

(下转第 258 页)