

中图分类号: TP 391.9

文献标识码: A

# 仿真资源共享机制与一体化的仿真资源服务

张 鹏, 邱晓刚, 孟荣清, 程子龙

(国防科技大学 机电工程与自动化学院自动化所, 湖南 长沙 410073)

**摘 要:** 首先, 分析了仿真资源的类型和特点, 总结了仿真资源描述的方法, 并利用四元组法进行仿真资源的形式化描述。接着, 探讨了仿真资源的集成和共享机制, 研究了资源共享的系统架构和数据接口。然后, 设计了遥感卫星仿真集成环境原型系统, 实现仿真任务的定制、仿真任务的分解与部署、资源的调度和仿真运行的监控。

**关键词:** 资源描述; 共享机制; 资源调度; 运行监控

## Sharing Mechanism of Simulation Resource and the Integrated Service of Simulation Resource

ZHANG Peng, QIU Xiaogang, MENG Rongqing, CHENG Zilong

(College of Electromechanical Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** First, the characteristics and type of simulation resources was analyzed, the description method was summarized, and the method of four elements was used for describe the simulation resources. Second, the sharing mechanism of simulation resource, the frameworks and the interfaces was discussed. At last, a remote sensing satellite integrated environment for the prototype was build, and it realize the custom madding and deploying of simulation mission, the dispatching of simulation resource and the monitoring of simulation process.

**Key words:** description of resources; sharing mechanism; dispatching of resources; monitoring of simulation

## 1 引 言

仿真是有目的地利用动态模型进行的实验<sup>[1]</sup>。一体化建模仿真支持模型的设计和开发、数据的准备和分析、仿真程序的编写和运行, 以及其他仿真相关需求和应用<sup>[2]</sup>, 并且整个一体化建模仿真过程是在仿真资源库的支持下进行的。但是, 一般的仿真资源管理系统只起到了资源文

件的存取作用, 没有达到资源集成管理的目的。另外, 一般的仿真资源管理系统不支持仿真任务的流程管理和运行监控, 不能对仿真建模提供全程的资源服务。

仿真综合集成环境<sup>[3]</sup>是将计算机信息技术、网络技术、知识管理方法、领域工程思想、现代模拟技术、虚拟现实技术等引入仿真工程领域, 将模型计算、领域知识以及专家知识有机结合起来, 通过综合集成仿真资源、规划仿真任务, 能够满足特定

基金项目: 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2008AA1212021); 国家自然科学基金基金项目(91024030)

需求的仿真应用。本文以遥感卫星系统仿真集成环境的构建为背景,探讨集成环境下仿真资源的共享机制,以及如何为建模仿真提供一体化的资源服务。论文针对仿真中的资源描述、资源组织与调度、任务部署等关键技术开展研究,设计并实现了遥感卫星仿真集成环境原型系统。

## 2 仿真资源的规范描述

### 2.1 仿真资源的分类

仿真资源多种多样,表现形式错综复杂,按照不同的标准有不同的分类方法。在一体化建模与仿真环境下,根据资源的属性特征以及资源形式化描述的要求可将仿真资源分为模型资源、数据资源、仿真应用资源和其他资源。

模型是对现实问题的抽象,是关于系统、实体、现象或过程的物理的、数学的或其他逻辑的表现形式,它可以是一段代码、一个应用程序或者一个算法<sup>[4]</sup>。模型是仿真建模中最核心的资源,仿真模型的种类涵盖了仿真所涉及的各个领域。

数据是指用一种适于交流、解释的方式对事实、概念或指令的形式化表达<sup>[5]</sup>,它可以是图像、文字,也可以是其他文件类型。模型的运行要靠数据驱动,数据资源也是仿真中的重要资源。

仿真应用资源是仿真运行过程中产生的资源,它在仿真过程中起着重要的作用。应用资源又可分为节点资源和任务资源。节点资源指的是在仿真某节点涉及的资源,比如观测数据等。任务资源是为了完成某仿真任务而产生的资源,比如想定脚本和仿真方案。

一体化建模与仿真环境下,仿真资源还包括仿真工具、仿真术语、文献资料、技术标准、算法和专家知识等其他资源。这种类型的资源一般都是建模与仿真必不可少的资源,它们格式多样,具有很大的不确定性。

### 2.2 仿真资源特点

资源异构性。在仿真综合集成环境中,集成的仿真资源可以来自于不同的仿真应用背景,不

同所有者很可能使用不同硬件和软件,导致了资源的异构性。由于其开发的结构、算法、用途等大不相同,因此集成管理时往往使用不同的资源管理策略。

资源动态性。仿真综合集成环境的资源状态是处于不断变化的,每时每刻都可能新的资源集成到环境中,同时系统根据用户需求提供特定的资源供仿真应用使用。另外,在仿真任务运行时,节点资源也是动态更新的,其负载情况也难以预测。

资源访问权限不一致。仿真综合集成环境中不同资源的访问权限是不一样的,需要对资源的访问权限进行设置,不同类型的用户具有不同的访问权限。将资源的所有权和访问权限分离,确保资源的安全性,进而为用户提供可靠的资源服务。

### 2.3 资源描述方法总结

#### 2.3.1 元数据描述资源属性

对仿真资源的描述可以有不同的方法和途径,但最终都会归结到元数据的描述上。元数据主要由文字和符号组成,用来描述资源及其特征,元数据是资源特征和资源之间关系的集合<sup>[6]</sup>,它可以表示为:  $M = \{ \text{resource}, [P, R] \}$

其中,资源属性  $P$  可表示为:

$$P = \{ \text{resource}, [\text{property}, \text{value}] \}$$

两个资源之间的关系  $R$  可表示为:

$$R = ( \text{resource1}, \text{resource2} )$$

利用元数据来描述资源属性,可以方便资源属性的添加和修改,同时可以促进资源的优化管理和互联互通。对元数据的描述一般采用可扩展标记语言 XML 来进行描述。采用 XML 语言描述的元数据具有很好的格式,很多工具和平台都可以获取并解析元数据,有利于信息的交换。

#### 2.3.2 资源描述框架

资源描述框架(Resource Description Framework, RDF)是一种基于元数据的语义描述语言<sup>[7]</sup>。RDF用URI来标识事物,用简单的属性及属性值来描述资源。一个RDF资源描述模型文件包含多个资源描述,一个资源描述由多个语句构成,

每个语句是由资源、属性类型、属性值构成的三元组。RDF 只是提供了少量的基础性词汇,并定义了一些规则,只要符合这些规则,人们可以描述任何资源。RDF 采用结构化的 XML 数据,使得资源的存储和管理都很方便,该方法广泛用于互联网资源信息的描述。

### 2.3.3 仿真参考标记语言

仿真参考标记语言 (Simulation Reference Makeup Language, SRML) 是一种基于 XML 的用于表示仿真模型和资源的参考标记语言<sup>[8]</sup>。SRML 有一套完整的元素体系用来描述仿真模型,它声明了一组数量较少但相对完备的元素和元素属性,这些元素通过标签的形式对仿真实体、实体之间的关系和事件进行表达。SRML 允许用户在模型描述时插入脚本语言来描述模型的行为,同时它还为用户提供了一个可以运行描述文件的环境。SRML 采用基于 XML 的数据交换标准,SRML 结合 XML 和脚本语言能将组成仿真的所有属性和行为都译成计算机能运行的代码。

### 2.4 基于四元组的资源描述方法

四元组描述法就是基于本体描述的思想,将资源属性按特点进行分类描述,通过对资源的每部分属性进行描述从而形成仿真资源完整的形式化描述文档。仿真资源的四元组描述模型<sup>[9]</sup>为:  $P(r) = \langle BP(r), L(r), D(r), CP(r) \rangle$ , 它的描述框架如下:

```
< Object Descript = " " >
< BP AttributesSet = "基本属性" >
< Attribute Name = " " Descript = " " / >
.....
< /BP >
< L AttributesSet = "关联信息" >
< Attribute Name = " " Descript = " " / >
.....
< /L >
< D AttributesSet = "动态信息" >
< Attribute Name = " " Descript = " " / >
.....
```

```
< /D >
< CP AttributesSet = "自定义属性" >
< Attribute Name = " " Descript = " " / >
.....
< /CP >
< /Object >
```

其中:  $P(r)$  为资源的属性总集,包含资源所有可描述的属性;  $BP(r)$  表示资源的基本属性,它是所有资源都必须具备的属性;  $L(r)$  表示资源的关联信息,描述资源在仿真建模中与其他资源的关系;  $D(r)$  表示资源的动态信息,它记录资源在仿真运行时的动态变化情况;  $CP(r)$  表示自定义属性,允许用户根据资源的特点进行自定义。

根据以上分析,首先对仿真资源进行分类,确定需要描述的仿真资源属性。然后,根据资源类型对仿真资源属性进行分块,确定每部分描述内容。最后,建立仿真资源的四元组描述模型,进行形式化描述。利用四元组法进行资源描述生成的形式化描述文本具有很好的层次关系。可以把资源的每个属性看成一个元数据,不同平台和编辑器解析资源的形式化描述文本,从中获取这些元数据。通过这些元数据可以获取仿真资源的资源属性,实现不同平台之间信息和数据的交换。

## 3 仿真综合集成环境中资源的集成和共享

仿真综合集成环境允许用户利用综合集成的各种软硬件资源组合仿真模型、制定仿真任务、优化部署仿真资源和实时反馈运行结果。它将不同类型的仿真资源导入到仿真综合集成环境,接受用户仿真任务的资源请求后,资源库调度相应的仿真资源,完成仿真任务运行,实现仿真软硬件资源的共享和重用。

### 3.1 资源集成与共享的相关要求

能够实现分布异构的仿真资源的综合集成。在仿真综合集成环境下,首先要对仿真资源进行领域分析,提取这些异构资源的特征,用统一的资源

描述语言进行描述,建立有效的资源导入、查询、更新和调度途径。较一般系统而言,综合集成是更高层次、更广范围的集成,能够跨仿真领域、跨建模方法,实现各领域仿真资源的统一管理。

支持多用户多任务仿真操作。仿真综合集成环境屏蔽了各个模型的差异性,以及各计算节点的运行任务、硬件等的差异性,能够支持多用户的大规模仿真操作。鉴于有的仿真对象的模型、数据过于庞大,不利于在网络中频繁传输,仿真综合集成环境采用分布存储仿真资源,均衡仿真计算负载,提高资源访问效率。

支持资源的组合与重用。采用基于组件的设计方法,领域中的资源可以灵活组合,产生新的资源供用户使用。在资源描述的过程中,集成环境对仿真资源进行模块化处理,用户根据需求利用系统开放的输入输出接口自行选择仿真资源并定制仿真流程。同时,把组合后的仿真资源作为模板资源自动导入资源库,从而实现了资源的组合与重用。

### 3.2 资源的集成和共享机制

仿真综合集成环境采用基于代理的中间件技术,实现资源的集成和共享。集成环境代理是一个能在异构网络中自主迁移,并可与其他代理交互的程序。它的框架包括四种类型的集成环境代理,即资源描述代理、资源索引代理、任务分解代理和资源调度代理以及由资源索引代理组织的仿真资源库,各部分的结构关系如图1所示。

在该框架下,资源的集成和共享通过代理来实现。其中,资源描述代理主要用于规范性描述综合集成环境所集成的资源;资源索引代理能够利用建立的资源索引目录完成资源的查找、更新等操作;任务分解代理主要用于分析用户提交的仿真任务的内部关系,并将仿真任务分解为计算任务序列;资源调度代理是整个框架的核心,负责为计算任务调度所需资源。四层代理实现了资源的规范描述、仿真任务的部署和仿真资源的调度。在该框架下,仿真资源库为仿真任务提供支持,完成仿真计算操作,实现了资源的集成和共享。

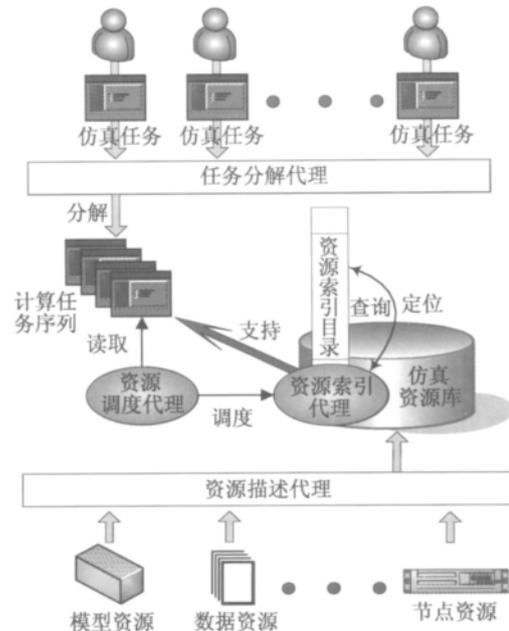


图1 仿真综合集成环境下的资源共享机制

Fig.1 Sharing mechanism of simulation resource

### 3.3 资源的集成和共享框架

为了实现资源的集成和共享,仿真综合集成环境的整体框架分为四个逻辑层次,包括支持层、仿真资源层、管理控制层和应用界面层,如图2所示。

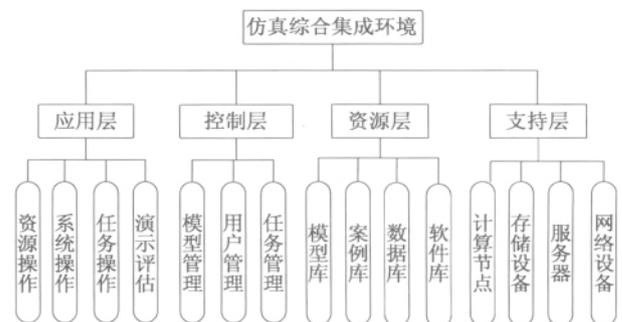


图2 仿真综合集成环境下的资源集成整体框架

Fig.2 Integration framework of simulation resource

支持层由高性能计算节点、大容量存储阵列和高速通信互联设备组成的硬件与由底层数据库服务器、WEB服务器、操作系统组成的软件,共同为整个仿真集成环境提供底层支持。这些设备和软件是构建仿真综合集成环境的基础,它们的处理、存储、通信能力和服务提供能力直接决定了仿真资源的管理能力和仿真任务的计算能力。

仿真资源层由模型库、数据库、案例库、软件配置库四个部分组成。其中,模型库存储用于仿真计算的运行模型。数据库用于存储仿真的输入和输出数据,以仿真任务为单元进行管理。案例库存储用户利用系统集成的模型资源组合定制而成的仿真任务资源。软件配置库存储仿真软件工具集和相关配置信息。

管理控制层是仿真综合集成环境的关键,用于解决集成环境的复杂性和异构性问题,负责管理环境中的仿真资源。对下屏蔽底层资源的异构性,将各种资源有机地组合在一起,形成仿真计算能力;对上提供用户界面接口,提出资源和任务的描述规范,用户根据这个规范开发兼容模型,制定仿真任务。

应用界面层为用户提供访问仿真综合集成环境的通道,能够直观、实时、可靠地反映仿真综合集成环境中资源集成情况、内部运行情况、节

点负载情况、协同管理情况等系统状态,具有多用户分布式远程并发访问能力,包括模型操作、数据操作、系统操作、任务操作等功能。

### 3.4 资源共享的数据接口

在仿真综合集成环境中,资源库模块是仿真资源的存储中心,同时也是连接各模块的重要环节。良好的数据访问接口对于资源的集成与共享至关重要,它直接关系到资源的管理效率和资源的重用性。仿真综合集成环境提供以仿真任务为核心的一体化资源服务,从数据管理的角度来看,它分为运行管理模块、节点计算服务模块和计算调度服务模块。图3为仿真综合集成环境的模块接口关系。资源库为运行管理模块、计算调度服务模块和节点计算服务模块提供了资源信息查询、资源上传和下载、资源更新等接口。同时资源库模块还作为运行管理模块与计算调度模块、节点计算服务模块之间的间接的数据交互接口。

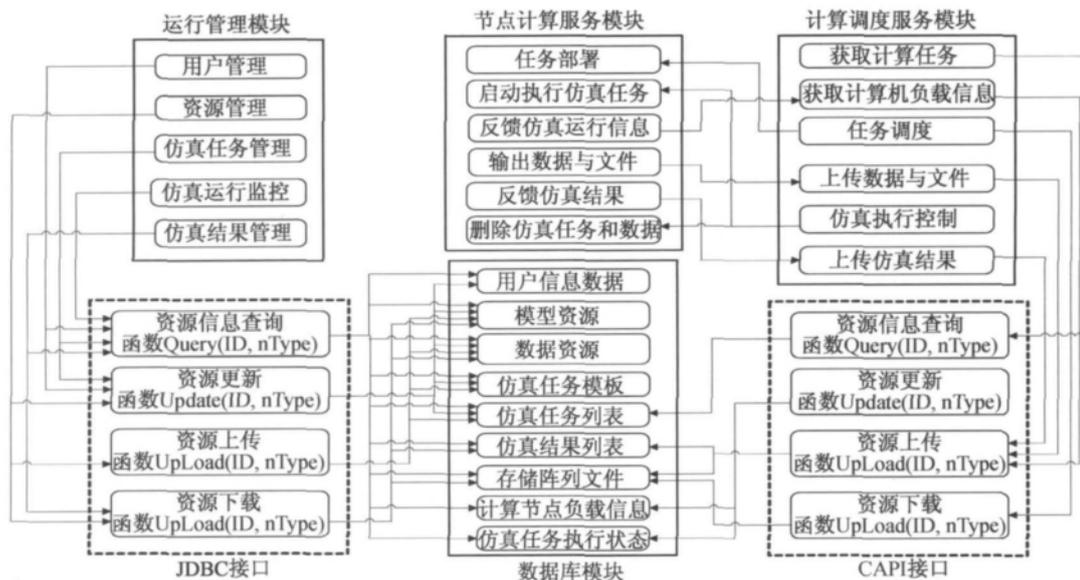


图3 模块接口关系

Fig.3 Relation of modules in the simulation system

运行管理模块中编辑好的仿真任务列表作为仿真运行的依据被存入资源库中,然后计算调度服务模块将通过资源库接口获取仿真任务列表,根据任务列表和计算机的负载状况来进行仿真任务的调度和部署。仿真运行过程中模型输出的数据和节点负载状况、任务执行状况,以及仿真结果都将

通过资源库接口,由节点计算服务反馈给计算调度服务,调度服务再将其上传到资源库中。用户通过运行管理模块从资源库中获取这部分信息,就可以实时观测仿真运行状况及事后查看和分析仿真结果。运行管理模块作为仿真综合集成环境与用户的唯一人机交互接口,为用户提供了执行仿真实

验 以及管理和控制仿真系统的功能。

### 4 面向仿真应用的一体化仿真资源服务

仿真综合集成环境就是为了向仿真用户提供一体化的资源服务。在遥感卫星仿真综合集成环境下,系统为用户提供了仿真任务定制、仿真任务部署和节点资源调度等服务,方便用户进行仿真。

#### 4.1 仿真任务的定制和部署

在仿真集成环境中仿真任务的定制有两种方法:第一种方法就是使用模型和数据来直接编辑仿真任务;第二种方法就是使用仿真任务模板来实例化,形成仿真任务。仿真任务模板是将所编辑的一组仿真任务作为一个通用的仿真任务流程保存下来,在以后需要相同的任务时由实验模板来直接生成仿真任务。在制定仿真任务时,需要查看模型信息、数据信息和仿真任务模板信息,同时给模型指定输入参数和数据文件。

用户以仿真任务的形式将仿真应用提交到仿真综合集成环境中后,资源管理系统的任务分解代理会根据所提交仿真任务的仿真运算特点,将仿真任务分解成一个个相互独立,可独立占用资源的计算子任务。这些计算任务作为原子任务在计算节点资源时,利用仿真模型资源处理仿真数据资源,完成资源的占用。所有计算任务在资源管理系统中以计算任务序列的形式存在,等候资源调度代理为其调度所需资源。仿真任务的部署如图4所示。

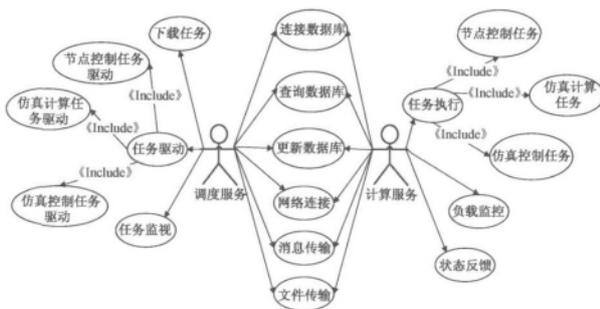


图4 仿真任务部署

Fig. 4 Deploy of the simulation mission

仿真综合集成环境具备自动化的资源部署和调度功能,仿真任务的部署与调度通过调度服务与计算服务协调完成。调度服务访问资源库,从资源库中下载所需的仿真任务,通过负载均衡算法将任务部署到计算节点,并对部署下去的任务进行监控。计算服务接到部署任务的命令后执行任务部署,在执行仿真计算任务之前,首先主动完成环境的配置。计算服务能够动态监测计算节点的负载以及仿真任务的执行状态并向调度服务反馈消息。调度服务将反馈回来的消息存入数据库,以供用户查询和浏览。

#### 4.2 计算调度与节点计算服务

计算调度服务模块是仿真系统运行的引擎,驱动任务的执行和仿真实验进程<sup>[10]</sup>。资源调度的基本原则是保障资源为仿真任务的完成服务,还要考虑资源在时间和空间上的搭配,把资源库中所有可用资源与任务的资源请求进行匹配,找到最合理的资源分配方式和资源调度策略,各个计算任务能够得到适合自己的资源节点。调度服务模块内部逻辑结构如图5所示。

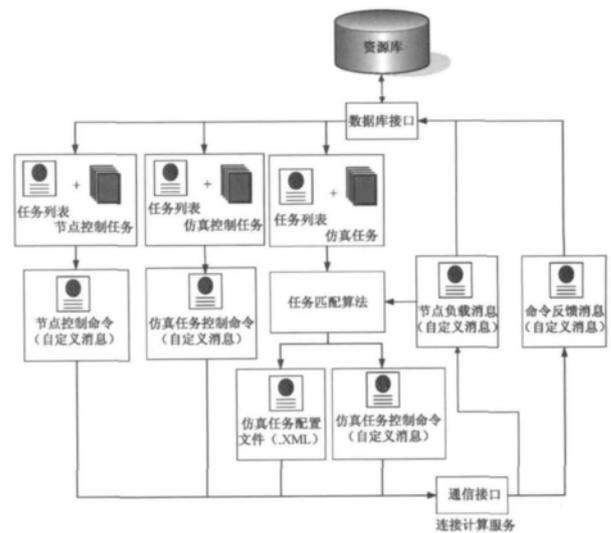


图5 调度服务模块内部逻辑结构

Fig. 5 Interior logic structure of scheduling service

计算调度服务定时地访问数据库中的任务列表,下载计算条件满足的仿真任务,然后将仿真任务部署到计算机节点,并向节点计算服务发送命令,启动仿真任务的计算。用户上传的任务

包括计算节点控制任务、仿真计算任务、仿真控制任务。当提取到计算节点控制任务时,形成计算节点控制命令消息,通过通信接口传递给计算服务并等待命令执行的反馈消息;当提取到仿真计算任务时,根据反馈的节点负载信息,生成仿真任务配置文件和仿真任务控制命令,仿真任务配置文件包含了计算任务运行所需要的输入文件资源、配置文件资源以及输出文件路径等信息,通过通信接口传递到计算服务,并等待反馈信息;当提取到仿真控制任务是形成仿真控制任务命令,通过通信接口传递给计算服务,等待命令反馈信息。

节点计算服务模块是仿真运行的执行载体,它对仿真模型和软件工具进行控制,包括程序的启动、关闭、启动参数的传递、数据文件的输入和输出、任务状态和节点状态的反馈等,从而实现仿真系统的具体执行。节点计算服务模块监视由调度服务发送过来的消息和文件。当接收到节点控制命令时,执行重启、注销、关机等操作并返回执行结果;当接收到仿真配置文件时,进行仿真资源配置并返回资源配置情况;当接收到仿真任务控制命令时,执行仿真任务启动、停止、删除的动作并返回执行情况。

## 5 应用

遥感卫星天地一体化仿真系统的运行环境具有如下特点:仿真处理数据量巨大且计算密集;仿真工作流程串行化;多用户并发建立多任务;进行多参数实验设计。

下面以光学遥感卫星的全链路仿真任务的建立、运行为例,介绍遥感卫星天地一体化仿真系统的一个实际应用。通过该实例展示遥感卫星天地一体化仿真系统对仿真任务进程的控制、实现模型、初始数据、参数信息和仿真运行结果的一体化集成管理。

仿真任务光学卫星模型都是串行运行的,具有很强的重用型,可以建立模板对模型进行集成管理。在进行实际仿真时,通过将已有的模型模

板进行实例化,配置初始化数据和运行参数,生成仿真任务,实现一次仿真应用。最后,将运行结果存入数据库进行分析评估,允许多次运行建立好的仿真任务实现多次仿真。遥感卫星仿真综合集成环境的工作流程如图6所示。

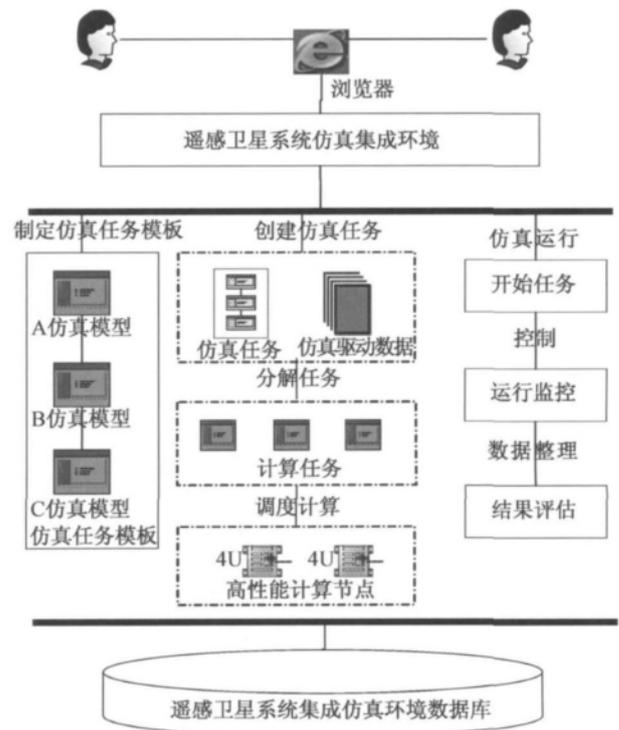


图6 仿真综合集成环境工作流程

Fig. 6 Workflow of the simulation environment

该仿真案例展示了利用遥感卫星天地一体化仿真系统进行建模仿真的全过程,它包含仿真资源的上传、模型模板的建立、仿真任务的管理以及仿真结果的入库和评估等。它体现了综合集成环境对仿真全过程的资源管理能力,定制仿真流程和任务的能力,自动化的任务部署和资源调度的能力,仿真实时监控的能力和多个用户并发访问的能力。该系统实现了资源的集成管理以及仿真任务的全程控制,具有很强的实用性,对遥感卫星一体化建模仿真意义重大。

## 6 总结

论文讨论了仿真资源分类和仿真资源描述方法,对仿真资源的集成和共享机制进行了系统

研究,设计和实现了遥感卫星系统仿真集成环境,向用户提供面向应用的一体化仿真资源服务。系统实现了资源的集成管理和仿真任务的全程控制,对于遥感卫星集成仿真具有很强的现实意义。

#### 参考文献:

- [1] 黄柯棣,邱晓刚.建模与仿真技术[M].长沙:国防科学技术大学出版社,2010.  
HUANG Kedi, QIU Xiaogang. The technology of modeling and simulation [M]. Changsha: The Press of National University of Defense Technology 2010.
- [2] 卿杜政,李伯虎.基于组件的一体化建模仿真环境(CISE)研究[J].系统仿真学报,2008,20(4):900-904.  
QIN Duzhen, LI Bohu. The integrated simulation environment based on component [J]. Journal of System Simulation 2008, 20(4):900-904.
- [3] 胡鹏.仿真综合集成环境中资源描述方法与技术研究[D].长沙:国防科学技术大学,2010.  
HU Peng. The description of simulation resource under the comprehensive environment [D]. Changsha: National University of Defense Technology 2010.
- [4] 文明.HLA仿真资源描述与管理方法研究[D].长沙:国防科技大学,2006.  
WEN Min. The management and description of simulation resource in HLA [D]. Changsha: The National University of Defense Technology 2006.
- [5] 宫民,王行仁,贾荣珍.基于模型库/数据库的面向对象综合仿真环境框架[J].系统仿真学报,2000,12(6):656-659.  
GONG Min, WANG Xingren, JIA Rongzhen. The framework of the model database under the comprehensive environment [J]. Journal of System Simulation 2000, 12(6):656-659.
- [6] 吴延林,邱晓刚,刘宝宏.基于Web仿真模型系统的设计[J].计算机工程与设计,2006,22(27):11-23.

WU Yanlin, QIU Xiaogang, Liu Baohong. The web-based database design of simulation model [J]. Computer Engineering and Design 2006, 22(27):11-23.

- [7] 徐洁.基于资源描述框架的安全性研究[D].南京:东南大学,2007:35-48.  
XU Jie. The security of the framework of resource description [D]. Nanjing: The University of Southeast China 2007:35-48.
- [8] 刘晨,黄炎焱,李群,等.基于DEVS扩展SRML大纲:仿真模型表示和重用的基础[J].系统仿真学报,2005,17(10):2363-2367.  
LIU Chen, HUANG Yanyan, LI Qun, et al. The description and reuse of simulation models based on DEVS and SRML [J]. Journal of System Simulation, 2005, 17(10):2363-2367.
- [9] 张鹏.一体化建模仿真环境中资源管理关键技术研究[D].长沙:国防科技大学,2011:20-24.  
ZHANG Peng. The key technology of simulation resource management in the integrated environment [D]. Changsha: The National University of Defense Technology 2011:20-24.
- [10] 张越平.仿真综合集成环境资源管理系统研究[J].系统仿真学报,2011,23(8):1606-1609.  
ZHANG Yueping. The management of simulation resource under the comprehensive environment [J]. Journal of System Simulation 2011, 23(8):1606-1609.



张鹏 男(1987-),重庆人,博士生,主要研究方向为分布式仿真系统的设计、面向对象仿真实论、知识工程。



邱晓刚 男(1963-),江西人,教授,博导,主要研究方向为分布式仿真系统的设计,面向对象仿真实论、平行控制、复杂大系统仿真。