

支持复杂大系统的设计仿真一体化技术研究

王超, 吕崇德, 高琪瑞, 李士锦

清华大学热能工程系, 北京 100084

[摘要] 支持复杂大系统设计仿真一体化支撑平台(简称 SISP)的研究,主要基于复杂大系统的设计仿真的一体化技术,该技术以仿真为手段,进行复杂大系统的数字化模型设计、协同仿真、虚拟测试。在设计上,可提供一个数字化模型设计支撑功能,从而为复杂系统数字化设计提供技术保证;在仿真上,可提供一个基于复杂大系统的子系统/分系统的独立模型仿真和基于 HLA 体系结构的整个复杂系统分布式协同仿真;在测试上提供一个虚拟的测试环境,可以进行复杂系统的评估、验证。在平台应用上,3 个功能软件可无缝集成在一起。

[关键词] 复杂大系统;模型设计;仿真平台;虚拟测试

[中图分类号] TP391.9

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-7857(2007)10-0010-05

On Integrated Simulation Support Platform Oriented Towards Complex Large-scale Systems

WANG Chao, LU Chongde, GAO Qirui, LI Shijin

Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract: The Integrated Simulation Support Platform (ISSP) is based on the simulation technologies of complex large-scale systems, and it supports modeling, cooperation simulation and virtual test. The numerical modeling support technology simplifies large-scale system modeling. Using the simulation database, a complex system can be splitted into several sub-systems and these sub-systems can associate with each other in real time. With the virtual test technology, the simulation validation can be done in a test environment. These technologies are integrated into ISSP, making it user-friendly.

Key Words: large-scale complex system; model design; simulation platform; virtual test

CLC Number: TP391.9

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2007)10-0010-05

0 引言

随着电子技术、计算机技术的不断发展,其应用范围已经渗透到诸如航空、航天、电力、石油、化工等各个工业领域,使相应工业领域的产品越来越先进、应用越来越方便,随之而来的产品构成也越来越复杂。面对复杂大系统,以信息技术为依托的数字化工程设计技术被逐步提出。数字化工程设计技术是以数学模型为基

础,以 CAX(CAS, CAD, CAE, CAM, CAT, PPM 等)技术为依托,其核心内容主要包括建模技术、仿真技术、虚拟设计及虚拟样机技术、数字化预装配技术、并行工程及异地协同技术等。

基于电力系统及其相关领域发展的需要,以及数字化工程设计技术的发展状况,我们设计了支持复杂大系统设计仿真一体化支撑平台(简称 SISP),其宗旨

收稿日期: 2007-04-15

作者简介: 王超,男,北京市海淀区清华大学热能工程系,高级工程师,研究方向为仿真支撑系统研究及模拟器研究等;

E-mail: hblfm@mail.tsinghua.edu.cn

是以复杂大系统为背景、以仿真为手段,支持复杂大系统的数字化模型设计、协同仿真、虚拟测试^[1-2]。

1 SISP 的体系结构

1.1 复杂大系统的分解

要研究支持复杂大系统的设计仿真支撑平台,首先应该对复杂大系统进行概述。其实,任何一个复杂大系统都可以被看成若干单元的集成体。复杂大系统一般可分解为若干分系统,一个分系统又可分为几个子系统,一个子系统又可分为若干单元模块。一个单元模块可以被看成组成系统的基本单元,可以是一个独立设备、一个部件或一个元器件。相应地,复杂大系统模型构成分为系统模型、分系统模型、子系统模型和单元模型^[3]。基于此,SISP 的功能就是从复杂大系统的基本单元入手,提供整个复杂大系统的建模、仿真、测试的功能。

1.2 SISP 的组成及功能结构

基于复杂大系统设计仿真的需要,SISP 由模型设计软件、协同仿真软件、虚拟测试软件等 3 部分组成。

基于设计、仿真和测试的应用需求,在设计上,SISP 提供一个数字化模型设计支撑功能,基于数字化设计环境,支撑复杂大系统单元模型设计、子系统/分系统模型设计和系统模型设计,从而为复杂系统数字化设计提供技术保证;在仿真上,SISP 提供一个基于复杂大系统的子系统/分系统的独立模型仿真和基于 HLA 体系结构的整个复杂系统分布式协同仿真,可以进行复杂系统的仿真研究和仿真培训;在测试上提供一个虚拟的测试环境,包括被测系统的应用环境仿真系统、应用场景的仿真系统以及被测复杂系统本身的仿真系统,进行复杂系统的评估、验证;在平台应用上,3 个功能软件无缝集成在一起,功能结构如图 1 所示。

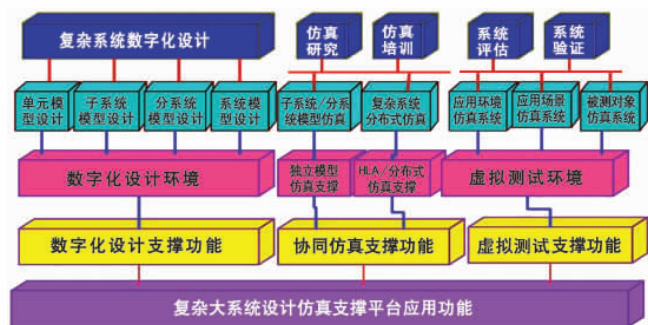


图 1 复杂大系统设计仿真支撑平台应用功能结构图

Fig. 1 Application structure of integrated simulation support system

1.3 SISP 的技术结构

基于电力、航天等仿真系统研制的需要,笔者已经进行了近 10 年的仿真支撑技术的研究,仿真支撑平台为电力、航天等仿真事业的发展作出了应有的贡献,也形成了一套先进的、特有的技术体系^[4-5],SISP 体系的技术结构基于原仿真支撑平台技术体系,现在进一步拓展为支持复杂大系统的设计仿真一体化的需要。技术结构如图 2 所示。

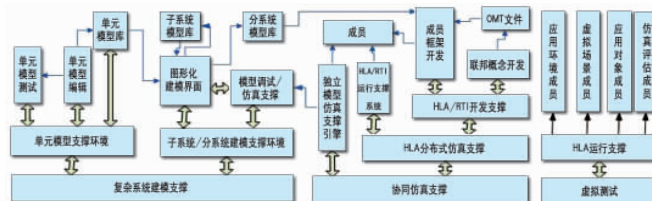


图 2 复杂大系统设计仿真支撑平台技术体系结构图

Fig. 2 System structure of integrated simulation support system

支撑平台在计算机操作系统上,提供了各个级别的模型设计支撑环境、仿真支撑环境和虚拟测试环境。其中,单元模型支撑环境是一个相对独立体系,每一个单元模型设计完后存入单元模型库;子系统/分系统的建模基于图形化建模环境,该环境通过仿真支撑环境的独立模型仿真支撑引擎,提供了在线调试、人机交互控制功能,可以动态地进行模型设计,实时修改模型直至达到满意,存入模型库;协同仿真支撑环境的独立模型仿真支撑可以单独运行、调试一个子系统模型或分系统模型;HLA 仿真支撑通过 HLA/RTI (Run Time Infrastructure) 开发生成联邦成员框架,成员的运行通过 HLA/RTI 运行支撑和独立模型仿真支撑共同完成,既保持了原单平台仿真的特色,又保证了分布式仿真的需求;虚拟测试仍然基于 HLA 体系结构,将仿真对象、对象应用环境、对象虚拟场景和测试评估分别作为仿真成员加入联邦系统。

2 SISP 的设计

根据 SISP 的体系结构,SISP 的设计包括复杂系统建模支撑设计、协同仿真支撑环境设计、虚拟测试环境设计以及基于模型设计的复杂系统数字化设计技术框架。

2.1 复杂系统建模支撑设计

复杂系统建模支撑设计包括单元模型支撑环境设计、子系统/分系统建模支撑设计以及它们的运行交互功能的设计。

2.1.1 单元模型支撑环境设计

单元模型支撑环境包括单元模型的编辑、编译与连接、单元模型库。单元模型系统结构如图 3 所示;基于单元模型支撑系统,单元模型开发过程使用流程如图 4 所示。

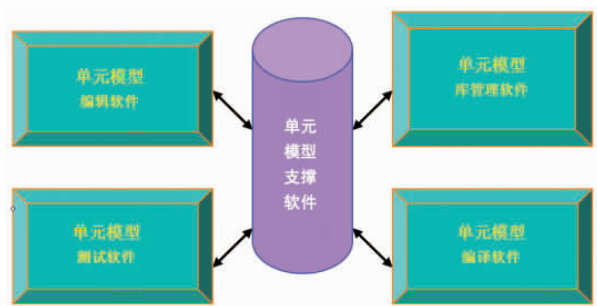


图 3 单元模型管理系统软件组成

Fig. 3 Components of unit model management system

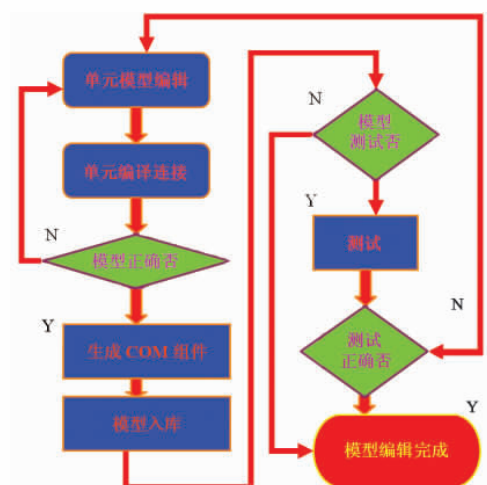


图 4 单元模型开发流程

Fig. 4 Unit model development procedures

2.1.2 子系统/分系统建模支撑环境设计

子系统或分系统是复杂系统相对独立的一个部分,其模型反映了该部分真实的物理特性,模型组成由各相关单元模型和单元模型之间的信息交互关系构成。SISP 建模支撑提供了一套方便、灵活的图形化建模和模型在线调试、动态运行的手段。建模中,利用图标对象将实际系统的组成用图标连接的方式表示出来,并自动生成系统模型运行环境。其中一个图标对象代表实际系统的一个单元模型,由单元模型设计生成,用这种方法可以方便地将实际物理设备及相互之间的连接关系用图形化的手段描述出来,然后自动生成子系统或分系统模型^[6-7]。图形化建模界面如图 5 所示。

建模支撑技术基于 SISP 协同仿真支撑的独立模型

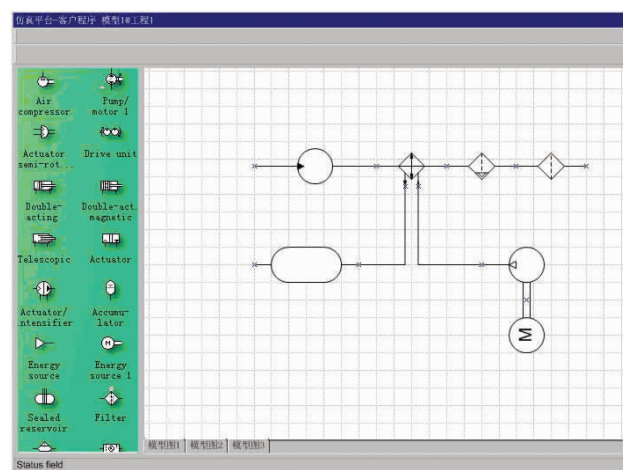


图 5 图形化建模界面

Fig. 5 Graphic user interface of modeling

仿真支撑引擎和单元模型库。图形化模型设计支撑环境的技术实现可以动态建立子系统/分系统数学模型,实时、在线地调试模型,同时支持不同用户的分布式调试和不同任务的调试^[7]。这种建模功能使得复杂系统的建模变得相当容易,极大地提高了建模效率,减轻了建模技术人员的工作强度。基于 SISP 技术结构(见图 2),建模支撑技术实现如图 6 所示。

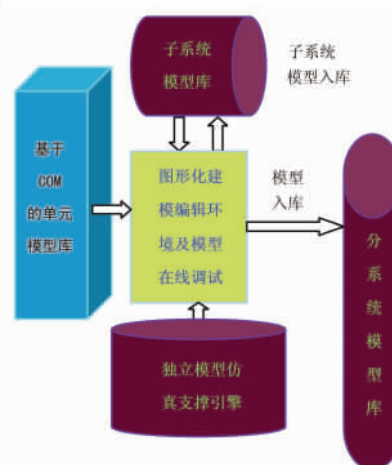


图 6 建模支撑技术原理

Fig. 6 Principle of modeling support

启动建模支撑环境后,仿真支撑引擎自动提供引擎服务,使得建模环境处在动态环境中。在建模过程中,打开单元模型库,选中单元模型,拖入动态的图形化编辑环境,所选单元既被实例化又实时运行,实现动态建模,相应的实例化单元模型和实例化变量通过引擎服务实现在线调试,模型调试好后,保存到模型库中。

2.2 协同仿真支撑设计

协同仿真支撑设计包括独立模型仿真支撑引擎技术和基于 HLA(High Level Architecture)的分布式仿真技术。

2.2.1 独立模型仿真支撑引擎

仿真支撑引擎是整个支撑平台的核心技术, 主要为独立模型(如子系统/分系统模型)设计、HLA 联邦成员实体模型运行提供引擎服务。包括实时数据库系统、实时数据库管理系统、共享内存管理系统、模型库和模

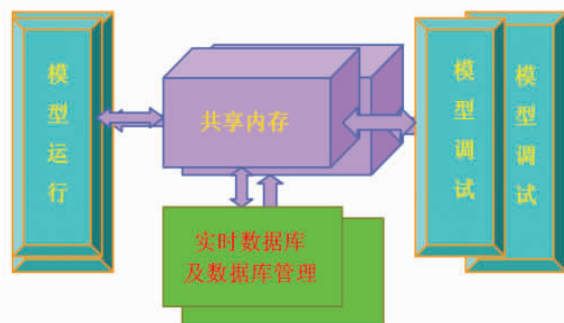


图 7 独立模型仿真支撑引擎

Fig. 7 Simulation engine of sub-model system

型库管理系统。软件结构如图 7 所示。

实时数据库是仿真支撑引擎的核心。由于复杂大系统模型中存在大量变量, 仿真运行中, 应对这些变量进行动态的追加、删除、修改和查询。一般实时仿真的时间步长为毫秒级, 数据刷新周期也可能低于数十毫秒, 因此对数据库的读取速度是非常高的, 一般商用数据库根本无法满足实时的需要, 为此开发专用的实时数据库^[3,8]。为了满足模型的在线调试、交互管理, 实时数据库的操作基于共享内存机制。由于模型和数据库共享数据内存空间, 无论任何一方改变了数据, 另一方都可以没有任何延迟地知道, 因此基于共享内存机制的实时数据库操作构成了独立模型仿真支撑引擎的基本结构。

基于仿真引擎支撑技术, 还可以实现在线的交互控制, 包括工况设定/加载、在线修改仿真运行周期、仿真运行的加速/减速、冻结/解冻整个仿真模型、进行单个故障和成组故障的插入和解除、自动或手动进行抽点存贮、进行任选时刻的系统复位、实时记录、运行结束后的系统回放。

2.2.2 HLA 分布式仿真支撑

对复杂系统可以看成由若干分系统构成, 每个分系统可以被看成相对独立的模型。复杂系统的仿真, 可以是各分系统的分布式仿真。SISP 的分布式仿真基于

HLA 高层体系结构。而 SISP 的 HLA 分布式仿真支撑从用户开发是否方便的角度出发, 不但提供 HLA 的联邦框架和联邦成员框架的开发手段, 还提供非常方便的成员实体模型的开发手段和联邦运行中各个成员的仿真进程的交互控制功能。软件开发及运行结构如图 8 所示。

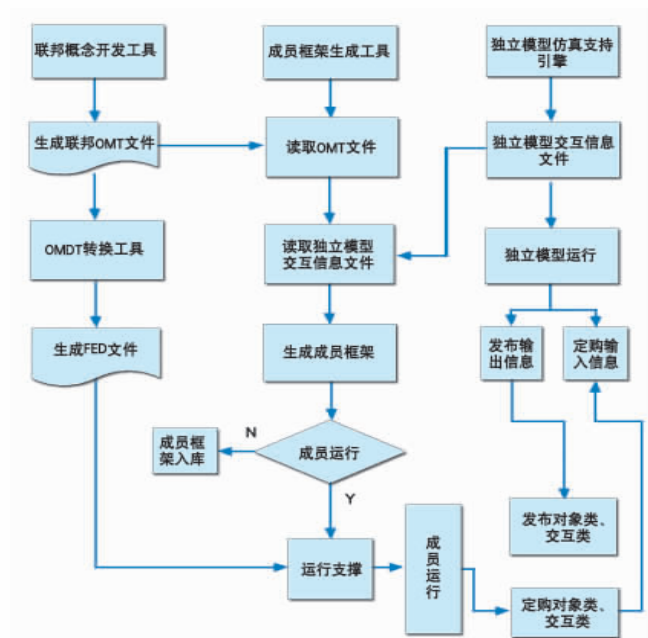


图 8 HLA 分布式软件开发运行结构图

Fig. 8 Development flow-chart of HLA distributed system

联邦概念是联邦框架的开发, 开发工具通过对联邦系统成员间的结构描述, 生成联邦系统 OMT 文件, 包括 FOM 表和 SOM 表, 再通过 OMDT 转换工具自动转换成 FED 文件。成员框架开发工具利用对话框方式通过读取 OMT 文件和独立模型交互信息文件自动生成成员框架。联邦成员的运行则是通过 HLA 运行支撑和独立模型仿真支撑引擎运行独立模型共同完成。两个工具是无缝集成的统一体, 既保证了 HLA 高层体系的特点, 也保证了独立模型仿真运行时的性能。

2.3 虚拟测试支撑设计

基于虚拟现实技术, 创建一个与复杂系统实际环境一致的虚拟现实环境, 包括虚拟场景、虚拟应用环境(如虚拟自然环境等), 以此建立一种接近复杂系统活动的“自然”环境, 用以测试/验证复杂系统单元模块以及整体技术性能, 以降低实际环境测试的风险和成本。虚拟测试系统的软件构成包括三维虚拟场景软件、应用环境软件、测试软件、评估软件、应用系统软件。系统运行环境仍然基于 HLA 分布式仿真支撑(参见 2.2.2),



图9 虚拟测试应用结构图

Fig. 9 Structure of a virtual test

应用结构如图9所示。

2.4 复杂系统数字化设计技术框架

复杂系统的模型设计是数字化设计的基础，其目的是通过模型进行复杂系统的数字化设计。传统的复杂系统的设计方法一般包括系统体系结构设计、系统功能设计、系统性能设计，根据系统设计进行生产、加工、调试等。而数字化设计过程，基于数学模型和仿真进行系统体系结构、系统功能和系统性能的数字化设计，根据形成的设计文档，进行单元模块的虚拟设计、虚拟组装、虚拟测试，再进行系统的生产、加工、调试等。数字化设计过程满足了复杂系统设计的自动化、标准化、并行化的现代设计理念，并通过对系统全生命周期所有信息的预测，实现系统的优化设计，最终使系统设计达到周期短、质量高、成本低的目标。数字化的设计过程通过可视化窗口方便、高效、高质量地完成复杂系统的设计，并利用模型设计、仿真一体化手段，在设计的每一步都可以对设计结果进行同步的仿真验证、分析、调整，使其能够利用仿真手段快速达到最佳设计效果。

复杂系统数字化设计流程如图10所示。

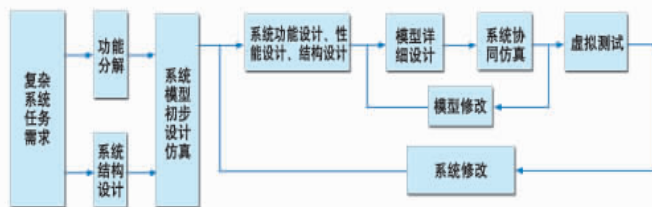


图10 数字化设计流程图

Fig. 10 Flow-chart of digital design

3 结论

基于复杂系统数字化设计技术的发展和相关行业的需求，笔者开展了这方面的研究。数字化设计是一个庞大的系统工程，重点对复杂系统的建模支撑技术、协同仿真技术、虚拟现实技术进行了深入研究，并在动态建模、在线调试、分布式仿真支撑、仿真进程的在线交互控制方面取得了突破性进展，为数字化设计的未来研究，如复杂系统单元模块虚拟设计、系统的虚拟组装和虚拟测试奠定了较坚实的基础。

参考文献 (References)

- [1] 吕崇德, 范永胜, 蔡瑞忠. 我国电站仿真技术进展与建模理论研究[J]. 中国工程学报, 1999, 1(1): 99-103.
LU Chongde, FAN Yongsheng, CAI Ruizhong. Development of simulation technologies and researches of modeling theory for power plant in China [J]. Engineering Science, 1999, 1(1): 99-103.
- [2] 吕崇德, 陆喆, 姜学智. 仿真技术在中国电力工业中的发展与应用[J]. 系统仿真学报, 1999, 11(4): 224-227.
LU Chongde, SUI Zhe, JIANG Xuezhi. Development and application of simulation technology on Chinese power industry [J]. Journal of System Simulation, 1999, 11(4): 224-227.
- [3] 王超, 吕崇德, 陆喆. 仿真一体化支撑平台技术[J]. 系统仿真学报, 2003, 15(7): 956-961.
WANG Chao, LU Chongde, SUI Zhe. Research on simulation integration support platform [J]. Journal of System Simulation, 2003, 15(7): 956-961.
- [4] 王威, 蔡瑞中, 吕崇德, 等. 电站仿真一体化环境[J]. 计算机仿真, 1998(2): 38-44.
WANG Wei, CAI Ruizhong, LU Chongde, et al. Integrated simulation environment for power plant [J]. Computer Simulation, 1998(2): 38-44.
- [5] 程芳真, 高琪瑞, 吕崇德, 等. 基于Windows平台的仿真支撑系统的研究[J]. 系统仿真学报, 2001, 13(2): 192-194.
CHENG Fangzhen, GAO Qirui, LU Chongde, et al. Research on simulation support system based on Windows [J]. Journal of System Simulation, 2001, 13(2): 192-194.
- [6] 吕崇德, 蔡瑞中, 王威. 电厂仿真图形化一体建模支持系统[J]. 系统仿真学报, 1999, 12(5): 380-382.
LU Chongde, CAI Ruizhong, WANG Wei. A graphic integrated modeling support system for power plant simulation [J]. Journal of System Simulation, 1999, 12(5): 380-382.
- [7] 程芳真, 朱伟, 吕崇德. 可视化计算与仿真支撑系统研究[C]//第四届北京国际系统仿真与科学计算学术会议, 北京, 1999.
CHENG Fangzhen, ZHU Wei, LU Chongde. Research on visual computation and simulation support system[C]//The 4th International Conference on System Simulation and Scientific Computing. Beijing, 1999.
- [8] 张聪师, 王兵树, 马永光, 等. 基于Web的在线实时仿真支撑环境研究[J]. 系统仿真学报, 2001, 13(4): 462-465.
ZHANG Congshi, WANG Bingshu, MA Yongguang, et al. Research of Web-based on-line real-time simulation support environment [J]. Journal of System Simulation, 2001, 13(4): 462-465.

(责任编辑 赵佳)