



经济学·管理学博士论著

基于高层体系结构分布 交互仿真的应用方法研究

The Application Method Research of Distributed Interactive
Simulation Based-on HLA

□ 窦志武/著



经济科学出版社
Economic Science Press



经济学·管理学博士论著

基于高层体系结构分布 交互仿真的应用方法研究

The Application Method Research of Distributed Interactive
Simulation Based-on HLA

□ 窦志武/著



经济科学出版社
Economic Science Press

图书在版编目 (CIP) 数据

基于高层体系结构分布交互仿真的应用方法研究 /
窦志武著. —北京: 经济科学出版社, 2009. 3
ISBN 978 - 7 - 5058 - 7992 - 8

I. 基… II. 窦… III. 计算机仿真 - 研究 IV. TP391.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 026966 号

责任编辑: 杨 梅

责任校对: 王肖楠

版式设计: 代小卫

技术编辑: 董永亭

基于高层体系结构分布交互仿真的应用方法研究

窦志武 著

经济科学出版社出版、发行 新华书店经销

社址: 北京市海淀区阜成路甲 28 号 邮编: 100142

总编室电话: 88191217 发行部电话: 88191540

网址: [www. esp. com. cn](http://www.esp.com.cn)

电子邮件: [esp@ esp. com. cn](mailto:esp@esp.com.cn)

北京汉德鼎印刷厂印刷

华丰装订厂装订

880 × 1230 32 开 5.75 印张 150000 字

2009 年 3 月第 1 版 2009 年 3 月第 1 次印刷

ISBN 978 - 7 - 5058 - 7992 - 8 定价: 13.00 元

(图书出现印装问题, 本社负责调换)

(版权所有 翻印必究)

前 言

21 世纪的社会是一个充满竞争的社会，能否掌握行业中不同系统的内在规律成为各行业成败的关键。计算机仿真与计算机技术的结合必将产生巨大的生产力，充分揭示系统的内在规律。计算机仿真越来越显示出其强大的生命力。

基于高层体系结构（HLA）作为分布交互仿真方法的新框架，是用来解决复杂分布系统仿真存在的问题的计算机仿真体系。与传统的单个仿真相比，该仿真方法通过运行支撑结构（Run-Time Infrastructure, RTI）提供通用的、相对独立的支撑服务程序，将仿真功能、仿真运行与底层通信三者分离，使各部分相对独立地运行，充分利用各自领域的先进技术，从而更好地对复杂系统进行精确的仿真，揭示其内在规律。

本书结合石化公司综合生产计划对基于 HLA 的分布交互仿真进行了研究，力求将最新的方法理论引入 HLA 分布交互仿真，增加其功能，提高仿真效率和结果，更好地为实践服务。本书从理论和实证两个角度对基于 HLA 分布交互仿真的应用方法进行了研究。

理论研究的创新点主要包括三部分：

(1) 提出了数据分发管理的变尺度动态网格算法。通过对过去各种数据分发管理算法的深入分析研究,在路径空间内引入动态变化的网格,提出了数据分发管理的变尺度动态网格算法。该算法随仿真系统的变化,动态改变路径空间内的网格单元尺寸,对数据分发管理的数据过滤率和仿真时间进行动态优化,解决了数据分发管理中数据过滤率低、仿真时间长等问题,提高了仿真效率和效果。书中通过仿真和实验,确定了网格单元尺寸与更新时间、数据过滤率、接收时间及排队时间的关系,并在此基础上对该算法进行了理论证明和公式推导,最终给出了该算法的应用公式。

(2) 提出了时间管理的动态调整 *Lookahead* 算法。根据 HLA 规范,深入分析了 *Lookahead* 及 *LBTs* 两者在 HLA 时间管理中的关系,对 *Lookahead* 重新进行定义,提出了时间管理的动态调整 *Lookahead* 算法。该算法通过将仿真中的事件分组,分段求解联邦同步,解决了仿真联邦同步时间长、仿真推进过慢等问题。通过该算法大大降低了仿真时间延迟,极大地提高了仿真成功率。

(3) 提出了网格环境下基于 HLA 分布交互仿真的资源动态交互框架。通过分析基于 HLA 分布交互仿真的资源分配机制和基于网格服务的分布交互仿真的通信机制,提出了网格环境下基于 HLA 的分布交互仿真的资源动态交互框架。应用该框架,既克服了基于 HLA 的分布交互仿真不支持资源动态分配的缺点,又弥补了单纯依靠网格服务开发分布交互仿真必须单独创建通信协议的不足。通过将两者集成,发挥了各自的优点,实现了仿真资源的动态分配、状态动态监控及任务动态迁移,同时将底层通信与仿真分离。该框架的实现极大地提高了网络的通信效率,降低了网络拥塞,仿真效果有明显的提高。

实证研究成果是将上面的理论研究成果加以应用验证。开发了中石油抚顺石化分公司综合生产计划的 HLA 分布交互仿真系统。在该系统中,实现了上面的理论研究成果。为了验证理论研究成果的正确性与有效性,书中将本系统的实验结果与采用其他方法的结

果进行了对比研究，结果真实可信，仿真时间消耗及数据过滤率都优于其他仿真方法，完全可用来指导生产，辅助生产决策。

理论与实证研究验证了基于 HLA 分布交互仿真方法是一种研究复杂系统的有效方法。该方法在实现上简便宜行，可充分利用各领域的先进技术，开发成本较低，具有较好的经济性；在应用上各部分相对独立，灵活性强，具有较好的互操作性和可重用性。因此对基于 HLA 分布交互仿真方法的研究在理论和实践上都具有重要的研究价值。

目 录

Contents



第1章 绪论 / 1

- 1.1 写作背景及意义 / 1
 - 1.1.1 理论背景及意义 / 1
 - 1.1.2 实际背景及依据 / 3
- 1.2 理论方法的研究现状 / 6
 - 1.2.1 历史沿革 / 6
 - 1.2.2 从技术角度看研究现状 / 15
 - 1.2.3 以往 RTI 软件存在的问题 / 31
- 1.3 研究思路与主要研究成果 / 32
 - 1.3.1 研究思路 / 32
 - 1.3.2 主要研究成果 / 34



第2章 数据分发管理的算法研究 / 36

- 2.1 数据分发管理的概念及基本原理 / 37
 - 2.1.1 数据分发管理的概念 / 37
 - 2.1.2 数据分发管理的基本原理 / 37

- 2.1.3 数据分发管理服务 / 40
- 2.2 数据分发管理算法的现状 / 41
 - 2.2.1 数据分发管理静态算法的现状 / 41
 - 2.2.2 数据分发管理动态算法的研究现状 / 48
- 2.3 基于网格的数据分发管理动态算法 / 51
 - 2.3.1 变尺度动态网格算法的提出 / 51
 - 2.3.2 变尺度动态网格算法的实现过程及流程 / 57
- 2.4 小结 / 61



第3章 时间管理的动态算法研究 / 63

- 3.1 时间管理的基本原理 / 64
 - 3.1.1 时间管理的重要概念 / 64
 - 3.1.2 时间管理原则 / 66
 - 3.1.3 时间管理机制 / 67
- 3.2 时间管理的算法研究 / 70
 - 3.2.1 时间管理算法中 *Lookahead* 及 *LBTS* 研究 / 71
 - 3.2.2 时间管理算法中 *GALT* 算法的研究 / 76
- 3.3 动态时间管理算法研究 / 82
 - 3.3.1 问题的提出 / 82
 - 3.3.2 时间管理的 *Lookahead* 动态调整算法 / 83
 - 3.3.3 性能测试与分析 / 85
- 3.4 小结 / 87



第4章 仿真资源动态交互的研究 / 89

- 4.1 问题的提出 / 89
 - 4.1.1 目前 HLA 在资源管理方面存在的问题 / 89
 - 4.1.2 仿真资源管理研究现状 / 91
- 4.2 网格环境下资源动态交互框架 / 93

- 4.2.1 网络环境下资源动态交互框架 / 93
- 4.2.2 网络环境下资源交互框架组件设计与实现 / 97
- 4.2.3 网络环境下资源交互的框架的特色 / 104
- 4.3 动态结构下仿真资源交互与负载平衡 / 106
 - 4.3.1 仿真资源交互过程 / 106
 - 4.3.2 应用实例结果 / 109
- 4.4 小结 / 110



第5章 实例验证 / 112

- 5.1 结构和功能 / 113
 - 5.1.1 系统的结构 / 113
 - 5.1.2 系统的功能 / 115
- 5.2 系统分析、设计及运行 / 115
 - 5.2.1 抚顺石化生产系统流程简介 / 116
 - 5.2.2 系统的组成 / 117
 - 5.2.3 系统开发 / 118
- 5.3 系统实现及仿真结果分析 / 123
 - 5.3.1 SOM 和 FOM 实现 / 123
 - 5.3.2 系统实现 / 126
 - 5.3.3 RTI 对联邦成员及交互实例的管理 / 129
 - 5.3.4 化工生产仿真系统结果分析 / 131



结 论 / 137

附图 本书研究的技术路线 / 140

附录1 HLA 仿真系统 .omt 文件 / 141

附录2 SOM 实现的关键代码 / 149

参考文献 / 155

后 记 / 170

第 1 章

绪 论

1.1

写作背景及意义

1.1.1 理论背景及意义

人类的进步推动着人类对复杂系统的不断探讨，系统复杂度的提高促使人们寻求更好的系统分析方法，系统仿真方法也就越来越显示出其强大的生命力，同时也对系统仿真的体系结构和仿真技术提出了更高的要求。

基于高层体系结构（High Level Architecture，HLA）的分布交互仿真（Distributed Interactive Simulation，DIS）是系统仿真用来构建大型复杂仿真系统的仿真技术方法，是通过将多个小型仿真系统联合起来构成一个大型复杂仿真系统，利于已有仿真系统的扩展、交互和仿真资源的重用以实现新的、更复杂的系统仿真技术。

本书所作的理论和应用研究都是针对基于 HLA 的分布交互仿真方法，后面提到的所有内容都归属于基于 HLA 的分布交互仿真方法的范畴。

在前人的研究中，已经认识到 DIS/HLA 的方法有如下优点：

（1）开放性。HLA 是一个开放的、面向对象的软件体系结构。

(2) 扩展性。HLA 可实现应用系统的即插即用, 易于新的仿真系统的集成和管理。

(3) 交互性。HLA 通过其运行时间支撑软件 (Run Time Infrastructure, RTI) 实现仿真系统之间的交互。

(4) 分布性。HLA 支持多台计算机实现的分布式仿真。

(5) 重用性。HLA 可以根据用户的不同需求对已有仿真系统进行重新配置和组合, 构建新的仿真系统, 实现仿真资源的重用。

正是由于这些优点的存在, 将基于 HLA 的分布交互仿真应用于军事系统、经济管理系统和社会现实系统的研究中, 为辅助决策提供依据, 具有重大的理论和实践意义。主要表现在:

1. 利于构建大型复杂系统的分布交互仿真模型

大型复杂系统中实体众多, 关系千差万别, 行为各异, 成功地对复杂系统中的实体、关系及行为进行仿真是至关重要的, 也是对设想的系统或方案作出决策的关键。通常的做法是建立单独的仿真模型。每设想一个新系统都对系统所涉及的实体、关系及行为建立新的、单个的仿真模型, 并单独进行仿真, 然后综合分析仿真结果作出判断。单独仿真由于受到仿真模型、实现语言、通信方式及具体功能的限制, 必然要有所取舍, 割断系统中实体之间的相互沟通, 这会使仿真偏离甚至违背原系统真实运行时的规律。通常的结果是: 一是针对每个设想系统都要重新建模, 对同一系统不同组织、不同目的仿真都要从头做起, 重复劳动, 增加开发、维护成本和开发时间, 浪费大量人力物力。二是相互之间没有交互功能, 每个仿真单体都要处理仿真实现、仿真运行管理和底层通信, 使实现仿真功能的细节与运行管理、底层通信混在一起, 增加了开发实现的困难。基于 HLA 的分布交互仿真方法能够充分利用已有仿真资源、程序开发复杂的大型仿真系统, 并将仿真功能的实现、运行管理及底层通信分离, 开发人员可以将精力最大限度地用于仿真功能的实现。各仿真联邦成员可通过 RTI 进行交互, 仿真结果能为决策提供更真实可靠的依据, 从而

提供系统的竞争力。

2. 利于分布仿真资源的动态优化和共享

以往单独仿真都是在各个开发单位或组织之内单独进行的，所有的仿真资源和仿真数据都不能得到优化和共享。随着各项技术的进步，各个领域研究的系统都越来越复杂，单个组织或单位都没有能力完成涉及几个组织或单位的复杂系统的仿真，只有将各种资源在系统所涉及的组织和单位内动态优化配置和共享，才能提供组织的竞争能力。

系统仿真广泛应用于各类系统的全生命周期活动及人员训练决策等过程中。近年来，在多媒体和虚拟现实（V. R）技术的支持下，仿真技术有了新的发展，创建了虚拟环境中对设想的系统或预测的事态进行演示验证的新方法，实现验证新技术的成熟性、实现的可能性以及系统的有效性，在科学理论和知识交互验证下，从最佳的整体优势出发制订方案确定技术途径。

国际上一致认为：仿真是迄今为止最有效的经济的综合集成方法，是推动科技进步的战略技术。

HLA 解决了仿真系统的灵活性和可扩充性问题，减少了网络冗余数据，并且可以将真实仿真、虚拟仿真和构造仿真集成到一个综合仿真环境中，满足复杂系统的仿真需要。因此对 HLA 的分布交互仿真的研究将极大地推动仿真技术向前发展，更有效地服务于科技进步。

1.1.2 实际背景及依据

本书是在横向课题“中石油抚顺石化分公司综合生产计划流程优化模拟”的背景下提出的。目前石化工业无论在国际还是在国内对经济的发展都有举足轻重的地位，如何发展石化工业已经成为各国竞争的重头戏。目前，全球石化工业正面临四大挑战和三大机遇。

四大挑战:

- (1) 全球化竞争: 大公司重组, 规模和技术优势凸显。
- (2) 环境与发展: 环保呼声高, 法规严格。
- (3) 石油资源配置: 总量不足, 需求上升。
- (4) 盈利空间减少: 石油化工行业逐渐走向成熟, 竞争加剧, 而获利减少。

三大机遇:

- (1) 资源的利用得到重视。油砂、煤、天然气和煤层气作为石油的接替资源。
- (2) 高新技术的应用更加广泛和深入。计算机、生物、纳米、催化、新能源和新材料等新的技术支撑。
- (3) 调整后周期性上升。

国外石化发展方向: 国外大型石油公司凭借资源和国际化的优势, 形成上下游一体化的主导产业, 为提高竞争力, 放弃非核心产业, 突出主导产业和技术优势, 淡出传统产业, 向更专业化和更精细化方向发展, 提高附加值。

国内发展的现状:

- (1) 区域分布矛盾仍很突出, 资源依赖进口程度加大, 产油和消费地区分割, 增加了产品运输成本。
- (2) 石化企业经过新一轮改造, 产品结构调整进步较大, 技术含量提高, 专业化、精细化意识增强。
- (3) 石化企业集约化发展程度提高, 规模进步提高, 资源优化程度得到提升。
- (4) 环境意识增强, 环保措施到位。
- (5) 国际化程度提高, 生产和经营进一步实现与世界经济的发展互接互补, 大力度地参与国际市场竞争。
- (6) 能源结构多元化, 石油替代战略实施进程加快, 相关科研和工业试验进展顺利。

我国炼油工业的普遍炼厂平均规模较小, 油品质量没有与国际

接轨,差距依然明显,二次加工装置结构不够合理。针对我国石化工业自身的特点、发展现状和面临的石化工业的机遇和挑战,采用什么样的技术或策略来发展我国的石化工业是亟待解决的重要问题。

对于国内的石化工业外部面临越来越激烈的市场竞争,自身又存在资源配置不合理、产品结构不适应市场需求等问题,目前国内大多采用优化方法和仿真方法来解决。由于石化工业是一个分布的复杂大系统,实体在地域上较分布,数据交换量大,约束较多。这使传统的优化和仿真方法应用困难:①建模难以将所有的约束包含在内,建模数据与实际系统的脱轨;②模型难以实现分布,所有的实体均包含在同一个模型内,模型结构与实际结构脱轨。造成求解结果不够理想,方法的重用性和扩充性差,项目投入大,开发时间过长。因此,必须寻求一种解决问题的有效方法,以达到有效解决问题;降低开发费用和周期;提高系统的重用性和扩充性。从而提高国内石化工业在全球市场中的竞争地位。从方法论的角度讲,解决任何一类问题都需要有正确的方法论作指导,解决问题的方法必须在结构和内容上都能很好地揭示问题的本质,才能有效地解决问题。通过对问题的剖析、分解和各种方法比较分析,得出分布交互仿真方法是解决这类问题的一种有效的方法。主要依据有四个方面:

(1) 在体系结构上,HLA 框架是支持实体地域分布的交互仿真结构框架,完全适合于化工系统现有的分布性的特点;

(2) HLA 的核心软件 RTI 提供的数据分发管理服务、时间管理服务提供了很好的数据交互、组织功能和时间管理功能,可保证化工系统的仿真数据真实可靠;

(3) HLA 是一个仿真框架,通过该框架可以对化工系统构建一个大的、虚拟的仿真环境,从而将传统方法(规划方法)无法包含的系统的内、外约束全部纳入其中,保证仿真环境的真实性;

(4) HLA 的开发思路就是扩充性和重用性,它不仅方便系统的扩充,可以对以往的传统仿真的程序加以改造、移植、重用,更重要的是对以往人的思维、知识、经验的重用和挖掘。

基于以上原因,采用基于 HLA 的分布交互仿真方法可以对整个石化工业系统进行全面的生命周期的仿真,能够对策略提前做出判断,给出依据,辅助决策。所以将基于 HLA 的分布交互仿真方法引入石化工业系统仿真对发展我国的石化工业具有不可替代的现实意义。

1.2

理论方法的研究现状

1.2.1 历史沿革

1. 仿真的概念与应用

仿真界专家和学者对仿真下过不少定义。艾伦 (A. Alan) 在 1979 年 8 月出版的《仿真》期刊上对众多的定义进行了综述,其中雷诺 (T. H. Naylor) 于 1966 年在其专著中对仿真的定义是:“仿真是在数字计算机上进行实验的数字化技术,它包括数字与逻辑模型的某些模式,这些模型描述某些事件或经济系统(或者它们的某些部分)在若干周期内的特征。”其他定义只作了一些概括描述,比如仿真就是模仿真实系统;仿真就是利用模型来做实验等。从这些有关仿真的定义中不难看出,要进行仿真试验,系统和系统模型是两个主要因素。同时,由于对复杂系统的模型处理和模型求解离不开高性能的信息处理装置,而现代化的计算机又责无旁贷地充当了这一角色,所以系统仿真(尤指数字仿真)实质上应该包括三个基本要素:系统、模型、计算机。而联系这三项要素的基本活动是:模型建立、仿真模型建立和仿真试验,如图 1.1 所示。

从图 1.1 可以看出,仿真和计算机已经不可分割地连接在一起了,于是计算机仿真 (computer simulation) 应运而生。计算机仿真是近 30 年发展起来的一项新技术,它是一门由系统工程、现代

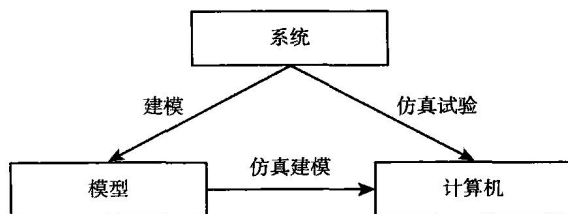


图 1.1 仿真三要素

数学方法和计算机技术等相结合的新兴学科。

计算机仿真技术是以计算机技术、网络技术、图形图像技术、面向对象技术、多媒体、软件工程、自动控制、数学理论、相似原理、信息技术与处理、系统技术及其应用领域有关的专业技术为基础，以计算机和各种物理效应设备为工具，利用系统模型对实际的或设想的系统进行试验研究的一门综合性技术。据最新的统计资料表明，计算机仿真技术是当前应用最广泛的实用技术之一。

仿真技术在发展初期多用于生物、原子物理等学科。随着计算机科学的发展，仿真技术已广泛应用于航空航天系统、交通运输系统、库存系统、市场预测系统，以及人口、生态、能源规划和国民经济的各个领域，并取得了明显的效果。计算机仿真的主要用途是：

(1) 计算数学模型。例如求解代数方程、微分方程、偏微分方程等，特别是对需要进行大量运算的统计分析和寻优计算特别有效。

(2) 设计新型控制系统的综合控制方案及参数选择、实现最佳规划等。

(3) 实施大型企业的科学管理方案及生产、操作人员的仿真培训工作。

(4) 系统生产集成后的性能测试试验。

(5) 计算机仿真技术科学应用于产品型号研制的全过程，包

括方案论证、技术指标论证、设计分析、生产制造、试验、维护、训练等各个阶段。

仿真技术不仅仅应用于简单的单个系统，也应用于由多个系统综合构成的复杂系统。

香农 (Shannon) 认为，有下列情况之一时，应考虑采用仿真的方法：

(1) 不存在完整的数学公式，或者还没有一套解答数学模型公式的方法。离散事件系统中的许多排队模型就属于这种情况。

(2) 虽然有解析方法，但数学过程太复杂，应用仿真可以提出比较简单的求解方法。

(3) 解析解存在而且是可能的，但超出了个人的数学能力，因此应该估算一下，建立模型、检查并且运行仿真模型的费用比起内外求助以获得解析解，何者合算。

(4) 希望在一段较短的时间间隙内观测到过程的全部历史，以及估计某些参数对系统行为的影响。

(5) 在实际的环境中无法进行实验观测，只能采用仿真，如在行星间的运载工具的研究。

(6) 需要对系统或过程的长期运行进行比较，而在仿真环境中可以随意控制时间，使它加快或减慢。

2. 仿真发展概况

最早的仿真又称为蒙特卡罗法，它是一种通过用随机数做实验来求解随机问题的技术。这种方法最早可追溯到 1773 年法国自然科学家 G. L. L. Buffon 为了估计 π 值所进行的物理实验。后来又发展出多种仿真方法，并成功应用在相关领域，下面简要列举一些例子：战场上使用的电子沙盘（地形、地物等）、战场实体的形体特性模型等就是用来仿真战场环境的，它利用的是这些模型与真实的战场之间存在相似的几何比例；用电路系统仿真机械系统，如利用一个 R. L. C. 网络电路来模拟弹簧系统运动，因为它们的运行特性所遵循的微分方程相似且参数一一对应。除此以外，还有一些其他