

基于 HLA 的复杂产品协同设计中数据一致性

刘 杰, 周以齐, 赵兴方

(山东大学 机械工程学院 高效洁净机械制造教育部重点实验室, 济南 250061)

摘 要: 通过分析复杂产品协同设计的特点和高层体系结构(high level architecture, 简称 HLA)在工程设计领域中的应用, 构建了一种基于 HLA 的联邦式协同设计系统体系结构, 阐述了系统中各平台的组成和功能. 为确保协同设计过程中联邦成员收发数据的一致性, 提出了各平台中联邦成员的时间管理策略, 给出了系统整体时间推进的方法和过程. 在时间管理策略的基础上, 通过采用设置内部和外部事件逻辑计数器方法和基于仲裁的锁定机制, 实现了系统运行过程中设计邦员动态注册的初始一致性.

关键词: 协同设计; 高层体系结构; 时间管理; 数据一致性; 动态注册

中图分类号: TP 391.9

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2009)12-1591-06

复杂产品具有几何结构复杂、信息量大、涉及学科领域多等特点. 在协同设计过程中, 经常会由于计算或网络的延迟、成员操作的并发性以及成员的动态注册等导致出现逻辑性的错误, 从而影响整个复杂产品的设计进程, 因此协同设计环境需要进行数据一致性控制, 这是协同设计领域的一个难点, 而且研究涉及到多个方面. 当前研究主要从异地编辑、多副本同步和并发冲突操作等可能导致数据不一致性的方面探究一种能维护系统数据一致性的可行方式^[1-3].

高层体系结构(high level architecture, 简称 HLA)是美国国防部提出的用于解决分布式交互仿真中仿真应用间的互操作的仿真接口标准^[4]. 作为一个通用的软件体系结构, HLA 已经开始从军事领域的应用转向工程设计领域的应用, 并在复杂产品的协同开发领域得到了高度重视^[5-8]. 由于复杂产品的协同开发过程复杂, 为实现异地各邦员收发数据逻辑关系的一致性和设计邦员动态注册的初始一致性, 作者在基于 HLA 的协同设计系统框架基础上, 通过设置系统的时间管理策略, 采用设置内外部事件逻辑计数器方法和基于仲裁的锁定机制, 确保设计过程中系统数据一致性.

1 基于 HLA 的协同设计系统

1.1 基于 HLA 的协同设计系统框架

基于 HLA 的复杂产品协同设计系统由协同控制平台、复杂产品设计平台和验证/优化平台 3 个功能平台组成, 每个平台根据职能任务的划分确定由一些担任不同任务角色的邦员组成, 联邦运行支撑环境(run-time infrastructure, 简称 RTI)作为一个软总线提供了底层通信传输服务, 使系统具有较好的扩充性, 便于实现邦员在设计过程的即插即用, 如图 1 所示. 协同控制平台主要为产品协同设计提供远程管理、并发控制和实时交互等技术保障; 在复杂产品的设计规则下, 通过对产品设计领域的规划和任务的划分, 由在复杂产品设计平台的项目组中担任不同任务角色的邦员协同完成产品设计; 验证/优化平台负责验证各邦员对象设计的合理性, 同时优化设计参数.

1.2 平台组成及功能

通过对系统框架的分析, 在国内外学者提出的产品数据模型^[9-12]基础上, 本文给出了如图 2 所示的面

向协同设计的复杂产品数据模型,并从更新数据、结构数据、管理数据和功能数据 4 个模块间的信息关系说明协同设计系统中 3 类平台的功能:

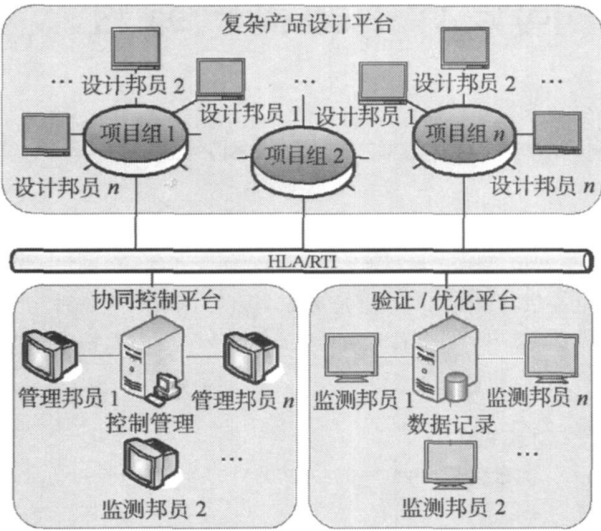


图 1 基于 HLA 的协同设计系统框架
Fig.1 Collaborative design system
architecture HLA-based

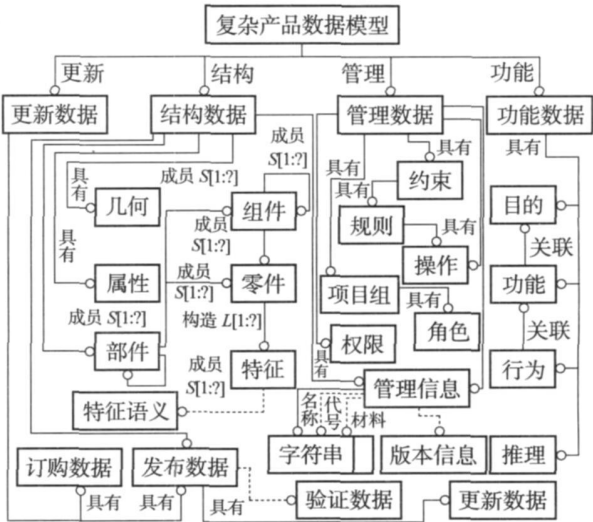


图 2 面向协同设计的复杂产品数据模型
Fig.2 Collaborative design-oriented
complex product data model

协同控制平台主要负责整个系统的协同控制管理,包括管理数据模块中的项目组管理、角色管理、权限管理和操作管理. 项目组管理描述了设计邦员从事领域和所处位置等;角色和权限管理针对不同任务角色赋予的不同级别的项目权限进行动态管理,同时协调各邦员间设计权限的转换;操作管理通过常用的操作功能控制整个协同设计系统的时间推进.

复杂产品设计平台负责完成整个复杂产品设计,项目组中担任不同角色的设计邦员以产品数据管理系统(product data management, 简称 PDM)为底层支撑,以功能数据模块描述的产品设计需求、设计者意图以及产品对象的功能和设计原理为指导,通过集成设计软件完成产品的数据结构设计,并利用更新数据模块中的产品对象属性发布/订购(publish/subscribe, 简称 P/S)关系和其他邦员进行实时数据通信.

验证/优化平台通过发布数据模块完成产品对象属性的订购,通过集成的分析软件进行数据合理化验证,对于不合理或者需要优化的参数,反馈到对应的设计邦员中进行修改.

2 邦员接收数据的一致性

为保证联邦内所有邦员都能以正确的逻辑顺序接收订购的产品对象参数,系统基于 HLA 的时间管理服务,通过分析各邦员所属的功能平台和担任角色,设定邦员的时间管理策略如表 1 所示.

表 1 邦员的时间管理策略
Table 1 Federate time management strategy

邦员类型	所属平台	邦员角色	时间管理机制	时间推进方式
管理邦员	协同控制平台	协同管理	TR 和 TC	TAR
设计邦员	复杂产品设计平台	产品设计	TR 和 TC	NER
监测邦员	验证/优化平台	数据存储	TC	TAR 或 NER

注:TR 为时间调整; TC 为时间受限; TAR 为时间推进服务;NER 为事件驱动服务.

设计过程中,设计邦员在对对象模型进行操作设计时不断地触发事件,因此设定其以不定时间步长的

事件推进方式 $NER(t')$ 请求逻辑时间的推进, 促使其他邦员相应的对象属性更新; 管理邦员管理整个协同设计过程, 以等步长的时间推进方式 $TAR(t)$ 推进系统逻辑时间, 定时刷新状态容器中设计邦员的状态参数表. 管理邦员和设计邦员都处于时间调整和时间受限状态 (TR 和 TC), 同时 2 类邦员以不同的时间推进机制协调推进系统的逻辑时间, 保证以时戳顺序接收数据; 监测邦员仅需要与其他邦员保持同步, 处于时间受限 (TC) 状态确保其以时戳顺序完成订购的对象参数的存储.

由于每个项目组具有设计领域的独立性, 不同项目组的邦员间存在较少的事件交互, 因此系统不考虑项目组间的邦员事件的时序接收. 系统中邦员能推进的最大逻辑时间记为 T_{GALT} , 为保证各邦员不会接收到过去的事件, 管理邦员和设计邦员能推进的最大逻辑时间为 $\text{Min}\{T_{GALT}(n), n \text{ 为邦员数量}\}$. 系统逻辑时间的推进过程如图 3 所示, 当时间推进授予 (time advance grant, 简称 TAG) 管理邦员时, 管理邦员继续以等时间步长推进系统的逻辑时间; 否则, 通过对项目组的联邦成员事件队列中具有最小将来逻辑时间戳的事件进行处理来推进系统逻辑时间. 设计过程中利用管理邦员和设计邦员的时间管理策略维持收发事件的正确次序, 确保邦员接收数据的时序一致性.

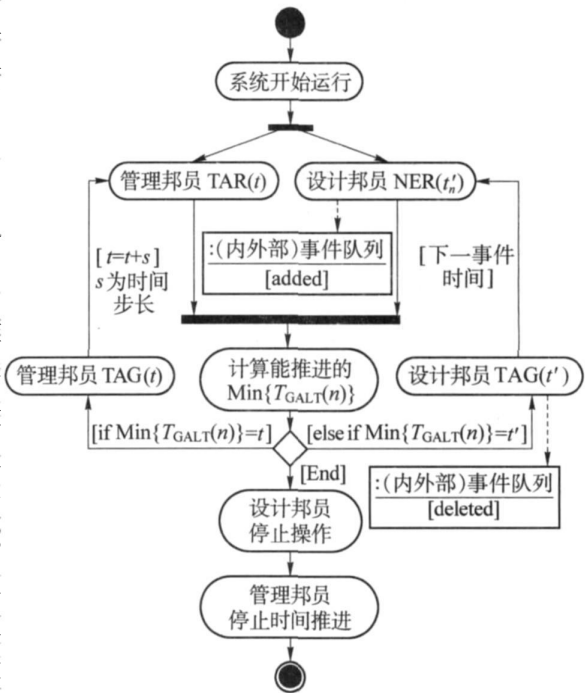


图 3 系统时间推进活动
Fig. 3 System time advance activity graph

3 事件逻辑计数器实现

基于 HLA 的复杂产品协同设计系统中, 根据邦员间的互操作规则把设计邦员的操作命令分为 3 类: 第 1 类属于 CAD 产品对象的添加或删除, 第 2 类属于 CAD 产品对象特征属性的创建和修改, 第 3 类属于实时同步浏览 (如视图缩放、视角转换等). 仅当设计邦员进行第 1 类或第 2 类命令操作时, 才能产生发送交互参数、删除对象实例或更新对象属性值等内部事件, 同时与其存在交互的设计邦员可能触发接收交互参数、移去对象实例或反射对象属性值等外部事件; 而设计邦员进行第 3 类操作时, 对其他设计邦员不产生影响, 不产生内部或外部事件.

联邦中使用时间驱动和事件驱动相结合的时间管理机制, 设计邦员需要维护自己的内部事件队列和通过感知其他与其存在交互的设计邦员产生的事件形成一个按时间戳排序的外部事件队列. 项目组中设计邦员的临界区都设置 1 个外部事件计数器 $E_{\text{counter}}[i] (0 \leq i \leq n, n \text{ 为设计邦员数})$ 和内部事件计数器 $I_{\text{counter}}[i]$, 分别记录外部和内部事件队列中的事件数量. 当设计邦员触发事件或同其他邦员产生交互时, 事件进入内部或外部事件队列, 对应的逻辑计数器的变量值加 1; 当完成事件推进或接收时, 从内部或外部事件队列中删除该事件, 逻辑计数器的变量值减 1. 因此, 当项目组中所有设计邦员的事件队列被清空, 即外部和内部逻辑计数器的变量值为 0 时, 表示领域项目组中各设计邦员数据库中的几何模型为最新的设计场景.

4 邦员动态注册的一致性

邦员动态注册是指设计邦员在设计过程中动态加入或退出指定项目组的过程. 为了实现设计邦员的即插即用, 同时维护邦员动态注册后的初始数据一致性, 在系统时间管理服务的基础上, 采用设置事件逻

辑计数器方法,确保新注册邦员更新得到最新的设计场景.

4.1 邦员加入的初始一致性

设计邦员 FJ 加入指定项目组而处于等待状态下的墙钟时间为 T_f , 项目组中所有邦员完成事件队列清空需要的墙钟时间定义为 T_g , T_g 的时间长短与项目组中计算机的处理能力和网络的拥塞程度有关,具有一定的不确定性. 当 $T_f < T_g$, 项目组中存在设计邦员没有清空其事件队列, 无法保证加入的设计邦员 FJ 更新得到最新的设计场景, 致使以后的协同操作均无法保证几何模型的一致性; 只有当 $T_f \geq T_g$, 即项目组中的所有邦员完成场景更新, 此时 FJ 更新得到的几何场景和项目组中的其他设计邦员的几何场景才具备初始一致性. 为保证设计邦员 FJ 动态加入的初始一致性, 即保证 $T_f \geq T_g$ 时开始要求场景更新, 在系统时间管理策略的基础上, 利用基于仲裁的锁定机制和事件队列的逻辑计数器方法动态设定 T_f . 假设初始状态下, 指定项目组中 2 个设计邦员的外部 and 内部事件队列中存在数量不等的事件, 队列中的数字表示事件的时间戳, 邦员加入项目组时的事件逻辑计数器的变化过程如图 4 所示, 具体描述如下:

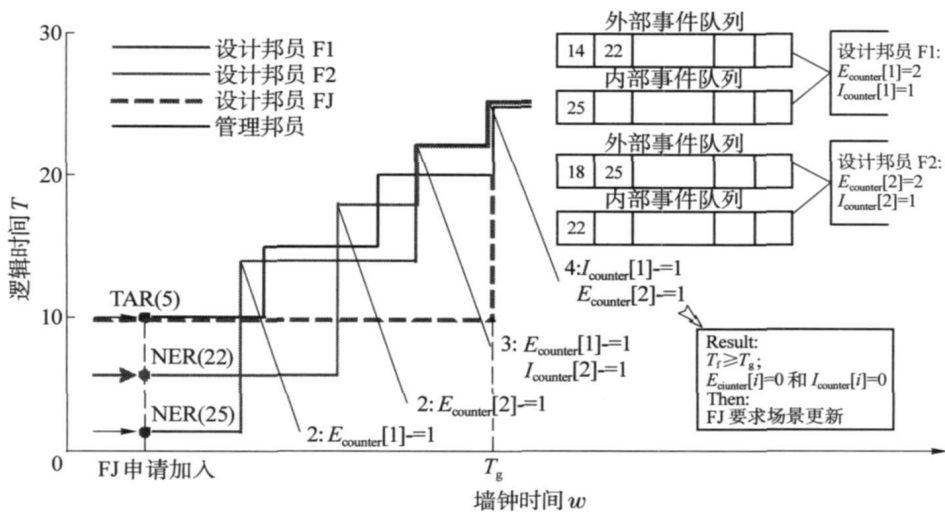


图 4 设计邦员动态加入过程示意图
Fig. 4 Dynamic join procedure chart of design federate

- 1) 操作锁定. 管理邦员感知到有新邦员 FJ 请求加入项目组时, 即要求 FJ 进入等待状态, 并对该项目组中的设计邦员进行操作锁定, 使其无法继续操作对象实体, 避免对场景中对象实体的进一步修改.
- 2) 时间推进. 管理邦员以 TAR 方式和时间步长 5 推进系统逻辑时间, 协同项目组中的设计邦员 F1、F2 完成内部事件的推进和外部事件的接收, 同时事件逻辑计数器的数值记录也随着进行相应的改变.
- 3) 场景更新. 当管理邦员确认项目组中每个设计邦员的外部 and 内部事件队列被清空时 ($E_{counter}[i]=0$ 和 $I_{counter}[i]=0$), 提示 FJ 开始场景更新; FJ 通过订购信息发送场景更新的请求, RTI 反馈此信息到对应项目组中的设计邦员, 进行产品对象信息的发布.
- 4) 操作解锁. FJ 完成场景更新后, 发送提示信息到管理邦员, 管理邦员收到信息后, 即对项目组中的设计邦员进行操作解锁, 解锁成功后系统进入正常设计状态.

4.2 邦员退出的初始一致性

为保证设计邦员退出项目组后其他设计邦员能继续以正确的逻辑顺序进行产品设计, 将设计邦员 FE 申请退出项目组的过程分为 3 个阶段, 当管理邦员确定成功执行每个阶段后, 同意其退出该项目组.

- 第 1 阶段: 邦员状态保存. 管理邦员对项目组中的其他邦员进行操作锁定, 推进系统逻辑时间, 等待 FE 清空内部和外部事件队列, 并完成状态存储后, 对项目组中的其他邦员进行操作解锁.
- 第 2 阶段: 设计权限转移. 为防止 FE 所拥有设计权限的对象实例属性变成无主状态 (unowned), 利

用 HLA 中的所有权管理服务主动地向项目组中其他设计邦员转让其对象实例属性的设计权限。

第 3 阶段: 项目权限判定。管理邦员根据 FE 担任的角色判断其项目权限级别, 如果它的项目权限级别高于其他设计邦员, 管理邦员应动态提升指定的项目组中设计邦员的项目权限级别, 使其等同于 FE 的项目权限级别。

5 结束语

随着计算机支持的协同工作技术的发展以及 HLA 技术规范在机车、船舶等工程设计领域广泛而深入的应用, 基于 HLA 的协同设计技术为工程中复杂产品设计、制造提供了一种新的方法和手段。作者通过对协同设计方式的分析, 提出采用基于 HLA 的联邦式分领域项目组的方式实现复杂产品的协同设计; 构建了基于 HLA 的复杂产品协同设计系统框架, 并利用复杂产品的数据模型描述平台的组成和功能; 通过对各平台中邦员担任角色的分析, 设置了邦员的时间管理机制和时间推进方式, 使各邦员能以时戳顺序接收事件, 确保邦员接收数据的一致性; 将设计邦员的操作命令分为 3 类, 确定可以触发内外部事件的操作命令, 提出采用一种事件逻辑计数器的方法记录设计邦员内部和外部事件队列中的事件数; 在系统时间管理服务的基础上, 通过利用事件逻辑计数器和基于仲裁的锁定机制的方法, 实现设计邦员动态加入和退出的初始一致性, 为设计邦员动态注册提供了一种可行的方法。

参考文献:

- [1] 刘巨保, 陈冬芳, 李新宇. 对等式协同设计系统数据一致性研究[J]. 计算机工程, 2008, 34(14): 90-91, 97.
LIU Ju-bao, CHEN Dong-fang, LI Xin-yu. Research of data synchronization for P2P-based collaborative design systems[J]. Computer Engineering, 2008, 34(14): 90-91, 97. (in Chinese)
- [2] 郭蕴华, 陈定方. 面向分布式虚拟设计的协同工作环境研究[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005, 17(1): 143-150.
GUO Yun-hua, CHEN Ding-fang. Research on cooperative work environment oriented to distributed virtual design[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2005, 17(1): 143-150. (in Chinese)
- [3] 何发智, 高曙明, 王少梅, 等. 基于 CSCW 的 CAD 系统协作支持技术与支持工具的研究[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2002, 14(2): 163-167.
HE Fa-zhi, GAO Shu-ming, WANG Shao-mei, et al. Research on collaboration support technology and toolkits for CSCW based CAD system[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2002, 14(2): 163-167. (in Chinese)
- [4] FREDERICK K, RICHARD W, JUDITH D. 计算机仿真中的 HLA 技术[M]. 付正军, 王永红, 译. 北京: 国防工业出版社, 2003: 1-31.
- [5] HIRONORI H, YOSHIRO F, YOSHIYU Kiy, et al. Manufacturing adapter of distributed simulation systems using HLA [C]//Proceedings of 2002 Winter Simulation Conference. San Diego: IEEE WSC, 2002: 1099-1107.
- [6] 肖田元, 范文惠. 基于 HLA 的一体化协同设计、仿真、优化平台[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(13): 3542-3547.
XIAO Tian-yuan, FAN Wen-hui. HLA based integrated platform for collaborative design, simulation and optimization[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(13): 3542-3547. (in Chinese)
- [7] 唐树才, 肖田元, 赵银燕. 基于资源管理联邦的复杂产品协同开发平台[J]. 计算机集成制造系统, 2008, 14(5): 898-903.
TANG Shu-cai, XIAO Tian-yuan, ZHAO Yin-yan. Collaborative development platform architecture of complex product based on resource management federation[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2008, 14(5): 898-903. (in Chinese)
- [8] 王克明, 熊光楞. 复杂产品的协同设计与仿真[J]. 计算机集成制造系统, 2003, 9(增刊 1): 15-19.
WANG Ke-ming, XIONG Guang-leng. Cooperative design and simulation for complex product[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2003, 9(Suppl 1): 15-19. (in Chinese)
- [9] 李小林, 吴锡英, 易红. 支持 CAD/CAAP 集成的产品数据模型[J]. 计算机集成制造系统, 1998, 4(3): 17-20, 29.
LI Xiao-lin, WU Xi-ying, YI Hong. A product data model for CAD/CAAP integration [J]. Computer Integrated

Manufacturing Systems, 1998, 4(3): 17-20, 29. (in Chinese)

[10] 孙国梓, 吴含前, 姜澄宇, 等. 一种基于面向对象原理的 PDM 产品模型框架[J]. 南京航空航天大学学报, 2002, 34(1): 86-89.

SUN Guo-zi, WU Han-qian, JIANG Cheng-yu, et al. A frame of PDM product model based on object-oriented theory[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2002, 34(1): 86-89. (in Chinese)

[11] ROSENMAN M A, WANG F J. CADOM: a component agent-based design-oriented model for collaborative design[J]. Research in Engineering Design, 1999, 11(4): 193-205.

[12] 苏财茂, 柯映林. 基于多组件 Agent 的协同设计系统[J]. 中国机械工程, 2006, 17(4): 724-729.

SU Cai-mao, KE Ying-lin. Multi-component agent based collaborative design system[J]. China Mechanical Engineering, 2006, 17(4): 724-729. (in Chinese)

Data Consistency for Complex Product in Collaborative Design HLA-based

LIU Jie, ZHOU Yi-qi, ZHAO Xing-fang

(Ministry of Education Key Lab of High Efficiency and Clean Mechanical Manufacture, School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: A federal system architecture based on HLA for collaborative design was constructed and the structure and function of the platforms were explained by analyzing characteristics of collaborative design for complex products and applications of High Level Architecture (HLA) in engineering collaborative design. To deal with the problem of data consistency in the process of designing, time management strategies of federates in every platforms were proposed, and the procedures of system time advancing were given. Meanwhile, by utilizing the way of setting logical counter of internal and external event and lock mechanism based on arbitration, the initial consistency problem of design federate dynamic registration was solved in the running process of the system.

Key words: collaborative design; high level architecture (HLA); time management; data consistency; dynamic registration

(责任编辑 梁 洁)