

复杂产品协同设计、仿真、优化一体化平台

范文慧, 肖田元

清华大学自动化系, 国家 CIMS 工程技术研究中心, 北京 100084

[摘要] 复杂产品制造业是国民经济和国家安全的重要基础, 它的竞争将直接关系到国力的兴衰。虽然支持复杂产品设计的计算机辅助设计、计算机辅助工程、计算机辅助优化等等工具已经得到了广泛应用, 而且也取得了明显的效果, 但是, 设计、仿真和优化工具都是独立地支持复杂产品设计, 缺乏协同设计、协同仿真和协同优化的深入应用, 尤其是三者之间的协同集成。现有产品数据管理系统在文档管理、产品结构管理、变更管理、工作流程管理等方面提供了很好的支持, 但是, 对于复杂产品协同设计、协同仿真、协同优化及其集成的支持还不足。因此, 本文针对复杂产品设计的特点, 从协同集成角度出发, 提出了复杂产品“协同设计、协同仿真、协同优化”一体化平台, 对提升复杂产品自主研发能力、加快研发速度、提高设计质量具有重大意义。

[关键词] 复杂产品; 协同设计; 协同仿真; 协同优化

[中图分类号] TP391.9

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-7857(2007)04-0015-10

Collaboration Integrated Platform of Design, Simulation and Optimization for Complex Products

FAN Wenhui, XIAO Tianyan

Department of Automation, National CIMS Engineering Research Center, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstracts: The industry for complex products is important for national economy and national safety. Although tools like Computer Aided Design, Computer Aided Engineering and Computer Aided Optimization have been used successfully, and with prominent results, the design, engineering, optimization are mostly dealt with separately, and in this way, the data of complex product virtual prototype is difficult to be managed. Now PDM system can manage document, product structure, engineering change and workflow jointly, but it can not integrate CAX process (CAD modeling process, CAE simulation process, CAO optimization process) and CAX data (CAD digital model, CAE analysis result, CAO optimization project). According to the features of complex product design, an integrated platform for collaborative design, simulation, optimization is proposed, which is useful in improving quality of complex products and reducing the cost.

Key Words: complex product; collaborative design; collaborative simulation; collaborative optimization

CLC Number: TP391.9

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2007)04-0015-10

0 引言

复杂产品指客户需求复杂、产品构成复杂、技术原理复杂、制造过程复杂、项目管理复杂、影响因素复杂的一类产品^[1], 如航天器、飞机、汽车、铁路机车车辆、复杂机电产品、武器

系统等。复杂产品往往涉及多个学科领域, 由机械、控制、电子、液压、气动、软件等不同学科领域分系统构成, 每个分系统又是由多个子系统组成, 而每个子系统则由成千上万个零部件构成(图 1 所示为铁路高速列车

复杂产品)。设计阶段决定了 83% 以上的产品成本, 而这一阶段本身所占的费用仅为产品总成本的 7% 以下^[2], 如何能够在短时间内设计出适应市场需求、具有良好综合性能的复杂产品, 对于企业的生存和发展有着重要

来稿日期: 2007-01-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(60474059), 国家 863 计划项目(2006AA04Z160)

作者简介: 范文慧, 男, 北京市海淀区清华大学自动化系, 副教授, 主要从事复杂产品协同设计、协同仿真和协同优化研究;

E-mail: fanwenhui@tsinghua.edu.cn

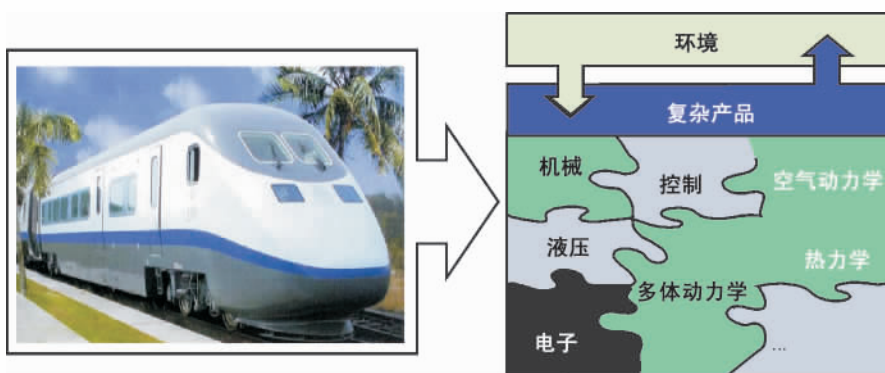


图1 铁路高速列车复杂产品

Fig. 1 Complex products of high speed railway carriage

的意义。

解决复杂产品设计的难题,仅靠研究各组成元素的行为是不够的,采用总体论的观点尤为重要。通过各部分之间的相互作用和整合,复杂系统将会涌现出全新事物。协同设计就基于这种思想,通过协同性提高任务完成效率;通过资源共享扩展完成任务的范围;通过任务的优化分配增加任务完成的可能性;通过避免有害相互作用降低任务之间的干涉。复杂产品协同设计仿真平台就是为了解决这个问题而提出的,它将为复杂产品设计提供一个设计、仿真、优化协同,以及组织、过程、工具集成的一体化协同集成环境。

1 三种协同技术

1.1 协同设计技术

协同设计必须以信息集成技术为基础,才有可能实现产品开发过程的集成;协同设计主要解决不同CAD之间、PDM与CAD之间的信息集成问题;协同设计不但体现了现代设计技术,也体现了现代管理技术。

复杂产品开发是一个反复迭代的过程,协作性是产品开发过程的明显特征。在网络环境下的信息社会中,制造活动的群体性、交互性、分布性和协作性更为显著。以Internet为代表的网络通信技术的发展缩小了时空的限制,极大地促进了分布式的协同产品开发^[3-5]。协同设计是一种分

布式产品设计模式,它对传统的设计手段和设计工具提出了新的要求,需要为用户提供实时的、在线的协同讨论和问题求解的协作工具和环境^[6-8]。协同设计是建立在多种学科的建模与设计活动基础之上的,是一个多学科协同的设计过程。

异地协同CAD系统的方法分为两类。第一种是使用协同工具将CAD应用软件包含在其中,这类协同工具有ShowMe,NetMeeting等。如陈春进^[9]、杨军^[10]等人在CAD支撑平台上引入基于特征的设计技术,以视频会议系统MS NetMeeting为基础平台进行了CAD系统的二次开发,支持共享应用和共享白板,可以通过NetMeeting调用Word、AutoCAD等应用软件,共享白板,包括共享区域和私有区域两部分。第二种方法是在CAD软件的基础上进行二次开发,加入网络通信功能,使之具有通过Internet交互数据的能力。李志强^[11]、窦万峰^[12]等人采用第二种方法对CAD系统进行二次开发,实现了AutoCAD下的Hot-Link,可以加载动态链接库。通过动态链接库集成NetMeeting,屏蔽编程细节,实现网络化交互功能。他们使用NetMeeting发送和接收信息,将一个设计者操作本地CAD系统的命令传递给其他设计者,这样设计过程中的改动就可以在设计人员中传播,以支持协同设计。该方法又可以避免传送整幅图像对

网络的过高要求。

基于Agent的协同设计系统:近年来有关Agent的各项研究在国外已得到迅猛发展,Agent一词通常被译为设计专家、智能体、智能主体或代理者等。如张勇^[13]给出了一种基于Agent协同设计系统总体结构,胡晓兵^[14]等人提出了支持并行工程的多Agent系统,并讨论了多Agent系统中协同求解、网络构建、多用户界面设计等关键技术。Agent目前还没有统一的定义,其协商、协作机制以及学习行为的建模与描述方法还不成熟,另外其通讯机制也是一个比较难解决的问题,因此在基于Agent协同设计系统这一领域中,仍需做大量的工作。

基于分布式计算模式的协同设计系统:清华大学的裴云彰等人^[15]开发了基于分布式计算模式的协同设计系统DCD,它的分布式强调面向系统的特性,追求透明性,屏蔽其他用户的动作,使用户有独占资源的感觉。使用Java语言,基于CORBA规范开发了DCD系统,将协作分为隐式(如共享对象)和显式(如电子邮件等)两种。它一方面支持多种类型的协作,集成了众多协作功能,提高了系统的通用性;另一方面增强了系统的开放性、扩充能力和可伸缩性,便于集成现有应用和开发新的应用,满足用户的特殊需求,有效地解决了系统通用性和用户特殊需要之间的矛盾。

此外,还有许多研究者采用了其他的信息技术实现了协同设计工作的计算机辅助手段。如基于Web的制造过程协同决策方法^[16]、基于产品装配模型、软件代理和特征技术的方法等。总之,多学科协同设计系统的实现形式不一而足,但其基本思想大体一致,即以多学科知识的集成为核心,实现产品设计过程的协同化。

协同设计必须以信息集成技术为基础,才有可能实现产品开发过程的集成。协同设计的思想体现在产品

生命周期各环节因素的综合平衡。多年来,人们经过研究提出了很多新方法,如计算机集成制造(Computer Integrated Manufacturing System, CIMS)、并行工程、敏捷制造、虚拟设计等新的概念和设计方法。协同设计是建立在上述研究成果的基础上,提出了在计算机协同工作环境中,通过对复杂结构产品设计过程的重组、建模优化,建立产品协同设计开发流程;是利用现代 PDM、CAD/CAM/CAPP、虚拟设计等集成技术与工具进行系统化的协同设计工作模式^[17]。

1.2 协同仿真技术

复杂产品通常都是包含多学科知识的复杂系统。面向复杂产品设计的仿真技术已经逐步从局部应用(单学科、单点)扩展到系统应用(多学科、全生命周期),产生了协同仿真技术和理论。

计算机仿真技术的发展为复杂产品设计提供了强有力的支持^[18-19]。在仿真技术的支持下,工程师可以在设计阶段对复杂产品进行全方位的测试分析^[20],展示产品的动、静态性能,将可能存在的缺陷尽早暴露出来并进行处理,争取减少或避免大的返工,从而达到减少产品开发的时间和经济投入、降低产品开发风险、优化设计、提高设计效率和产品质量的目的。美国的综合制造指南(Integrated Manufacturing Technology Roadmapping, IMTR)认为,仿真将是 21 世纪制造业的一项关键支撑技术,它在改进产品和过程、缩短市场响应时间,以及降低产品实现的成本方面,具有其他技术无法比拟的重要作用。目前,面向复杂产品设计的仿真技术已逐步从局部应用(单学科、单点)扩展到系统应用(多学科、全生命周期),并相应地产生了许多用于指导应用的新技术和新理论,典型的如基于仿真的设计(Simulation Based Design, SBD)技术^[21-23]、虚拟样机(Virtual Prototyping, VP)技术^[24-26]等。

仿真技术为复杂产品的设计开

发提供了强有力的工具和手段。经过多年的发展与完善,目前已经出现了大量成熟的商用仿真软件,典型的如 ADAMS、Maxwell、MATLAB、EASY5 等等,可以分别对动力学、电子、控制、液压等各个学科进行仿真分析。这些仿真软件被广泛应用到产品开发过程中,极大地提高了企业的产品设计能力。但另一方面,虽然现有的仿真工具可以有效辅助复杂产品某个功能单元的设计任务,能够很好地解决大部分单学科的分析评估问题,却很难处理涉及多学科交互的复杂仿真问题。

一般来说,现实世界中的复杂产品通常都是包含多学科知识的复杂系统^[27],*Science* 杂志认为,通过对一个复杂系统的子系统性能的了解,不能对复杂系统的性能作出完全的解释^[28]。如果复杂产品由分属不同学科的多个子系统组成,由于现有技术的限制,无法利用某一种仿真工具完成对多个学科的仿真,传统的做法是分别从单个学科的角度出发对复杂产品进行处理,如分别进行动力学子系统仿真、控制子系统仿真、液压子系统仿真等等。在进行单学科仿真的时候,由于无法很好地处理其他学科知识,通常需要将涉及其他学科的子系统加以简化甚至完全忽略。这种做法旨在将复杂问题拆分为不同的简单问题的组合,从而降低整个问题的复杂度,在实际应用中也有一定的效果。但由于复杂产品是一个统一的整体,各学科子系统之间有着不同程度的约束和交互,很难甚至不可能进行完全解耦。因此,如果只从某一个角度对其进行分析,忽略了学科之间的联系,势必将会造成系统整体性和相关性的丢失,从而导致仿真结果置信度的降低。一个复杂的仿真任务可能需要多个学科仿真软件相互协作共同完成。在系统工程理论的指导下,基于复杂产品中各个学科之间的内在交互关系,将位于不同地点、基于不同计算机平台、采用不同建模方法

建立的混合异构仿真模型,在分布式环境中联合起来进行多学科协同仿真,已经成为当前复杂产品设计领域仿真应用的重要发展趋势之一。

协同仿真技术的相关研究最先出现在军事领域。经过近 20 年的研究和探索,已经出现了大量的理论成果和成功的应用实例,为协同仿真技术在其他领域的应用和发展提供了宝贵的经验。20 世纪 80 年代中期,美国国防部提出了先进分布仿真(Advanced Distributed Simulation, ADS)技术的概念,其主要目的是将分散在各地的 260 个地面车辆(坦克、装甲车)仿真器用计算机网络连接起来,进行队组级的协同作战任务的训练。HLA 最早由美国国防建模与仿真办公室(DMSO)于 1995 年提出,并在 2000 年成为 IEEE 标准(IEEE1516)。HLA 采用面向对象的思想和方法来建立仿真系统,期望通过提供一个开放的、通用的技术框架,将建模与仿真领域中所涉及到的不同类型的仿真系统纳入到一个体系结构中,并支持仿真应用之间的互操作和重用性。HLA 可以将具体的仿真功能实现、仿真运行管理和底层通信三者分开,屏蔽各自的实现细节,从而使各部分可以相对独立地进行开发,保证了各领域最近技术的应用,降低了任务的复杂度以及开发的成本和时间,提高了仿真系统开发的可控性。由于其先进性和实用性,HLA 在军事领域的仿真中已经得到了许多成功的应用,而且由于其在技术上具有的通用性,同样可以应用到复杂产品设计领域。

国外关于复杂产品设计协同仿真平台的相关研究已经取得了很多理论和应用成果,Filho 等人^[29]研究了基于 WWW 的协同仿真平台技术;Ninios^[30]等人基于面向对象的思想对协同仿真平台进行了相关的研究;Gottlieb 和 McDonald^[31]对协同仿真平台中的元模型表达方法和外部仿真工具的集成方法进行了深入的研究。

美国空军实验室(AFRL)同其他公司和部门一起开展了协同企业环境(Collaborative Enterprise Environment, CEE)项目的研究^[32], CEE以加速仿真技术向应用阶段的转移为目的, 将先进分布建模与仿真技术、信息技术以及各领域工具集成到一个统一的框架中, 支持不同学科专家之间信息和技术的共享和集成, 提供跨学科的信息共享和决策支持机制, 以减少产品开发时间, 尽快将产品推向市场。为了建立一个集成化的虚拟开发平台, 研究和开发支持建模和仿真的工具和方法, 支持在产品开发初期对设计和制造过程进行决策和评估, Lockheed Martin 公司^[33]开发了仿真评估验证环境 SAVE(Simulation Assessment Validating Environment)。Harrison 等人^[34]认为协同仿真平台需要提供一个无缝的仿真环境, 可以对设计方案、制造过程、甚至整个工厂或企业的功能进行分布的、实时的仿真和评估, 支持集成产品与过程开发(IPPD)。

国内复杂产品设计协同仿真的相关研究起步不久, 虽然有些大学和研究所已经开发进行了研究和开发, 但尚未形成完善的方法和理论。典型的多学科协同仿真平台是由航天二院、清华大学、北京航空航天大学联合开发的协同仿真(CoSim)系统^[35]。清华大学国家 CIMS 中心的陈晓波、王克明、林宇等结合铁路摆式列车、轿车和大型心血管造影系统协同设计与开发, 提出并实现了多学科协同设计仿真平台^[36-40]。

1.3 协同优化技术

协同优化技术是多学科设计优化技术之一。多学科设计优化技术是充分探索和利用工程系统中相互作用的协同机制、考虑各学科(子系统)之间的相互作用、从整个系统的角度优化设计复杂产品的一种新的工程设计方法。

多学科设计优化可以说是航空航天科技发展的产物, 它在很大程度

上来源于提高飞行器总体设计水平的迫切需求。随着航空技术的发展, 对飞行器的研究逐步细分为气动、结构、推进、控制等诸多学科, 如何综合协调各个子系统进行多学科交叉设计成为了设计的瓶颈问题。早在 20 世纪 80 年代, 以 Sobieszczański-Sobieski 和 Kroo 为代表的科学家和工程技术人员就指出当时航空设计通行的各子系统序列设计方法有可能忽视了系统间的相互影响, 所得到的设计结果难以达到最优, 并陆续提出了一些对复杂产品进行分析及设计优化的方法。随着时间的推移, 这些思想不断完善, 并逐步形成了今天的多学科设计优化(Multidisciplinary Design Optimization, MDO)方法。NASA(National Aeronautics and Space Administration)给 MDO 的定义是: 在系统设计过程中, 必须考虑其所涉及的几门学科之间的互相影响和耦合作用, 并且设计者应同时在这几门学科中进行设计, 以使系统综合性能达到最优的一种设计方法^[41]。MDO 是一种进行复杂工程系统和子系统的设计方法学, 是探索学科之间相互影响、协调不同学科设计之间的耦合和可能遇到的冲突的综合方法。实施多学科优化方法的软件和硬件结构, 集成设计、分析工具, 使产品设计从孤立的、串行的过程成为并行的、协同的过程, 把产品设计的焦点从单独的部件级转移到产品系统级整体性能优化, 可以显著提高产品设计的效率^[42-43]。

多学科设计优化技术的实质是利用优化原理为产品的全生命周期设计提供理论基础和实施办法, 这与并行工程的思想非常接近。多学科设计优化技术是系统科学、优化论、工程设计学、并行工程理论、分布式网络计算技术与各学科分析方法相结合的产物^[44-45]。

MDO 作为一个研究领域, 美国政府、大学、软件公司和工业部门已进行了大量的研究、开发与应用工作^[46-49]。

美国政府已将多学科设计优化及相关技术纳入了“美国国家关键技术发展规划”, AIAA(American Institute of Aeronautics and Astronautics)和 NASA 分别成立了多学科设计优化技术委员会。AIAA 多学科设计优化技术委员会宗旨是为 MDO 的开发、应用包括教学提供一个论坛, 任务是确定多学科设计优化的学科范围, 收集关于 MDO 的信息, 引导 MDO 的研究方向和目标, 开展 MDO 的教学等。成立于 1994 年的 NASA 兰利研究中心 MDO 分部的主要任务是识别、发展和演示多学科设计优化方法, 迅速将有前途的 MDO 技术向工业界推广, 促进 NASA、工业界和大学相关的 MDO 基础研究。成立至今已经开展了多项 MDO 应用研究, 包括火星探路者、高速民机、气动塞式喷管、可重复使用运载器以及卫星概念设计等。

美国的高校 MDO 研究, 如斯坦福(Stanford)大学的 Kroo 等人长期进行协同优化方法研究; 佛罗里达大学的结构与多学科优化小组主要研究响应面近似技术、遗传算法、全局并行优化技术等; 鹿特丹大学的 Batill 教授等进行并行子空间研究; 弗吉尼亚州立大学的先进飞行器多学科分析与设计中心(MAD Center)开展 MDO 研究和教学工作, 还建立了包括波音、洛克西德·马丁在内的主要航天公司的代表组成的顾问委员会, 对 MDO 中需研究的问题提出建议。其它有关的 MDO 研究组织机构还有 NASA 兰利研究中心的计算机在科学与工程中的应用研究院(Institute of Computer Application in Science and Engineering, ICASE)、南安普敦大学的计算工程与设计中心(Computer Engineering and Design Center, CEDC)、卡内基梅隆大学复杂工程系统研究院(Institute of Complex Engineering System, ICES)等。高校主要负责多学科设计优化技术和学科分析研究。

美国的商业软件公司,如 Phoenix, Engineous, Synaps 等公司开发了支持多学科设计优化的框架。

美国的工业部门,如波音公司、洛克西德·马丁公司等,主要负责应用多学科设计优化技术。

在国内,多学科设计优化技术的研究处于刚刚起步的阶段^[47-52],仅有少数人员从事这一领域的研究,相关的研究成果也非常少。余雄庆等人在国外采用并行子空间设计方法进行了无人机的设计。国防科学技术大学的陈琪峰等研究了异步并行的分布式协同进化 MDO 算法,并将其应用在飞行器设计中。西北工业大学的谷良贤等人对协同优化算法的计算特性以及在飞行器设计中的应用作了研究。航天三院与华中科技大学合作开发了多学科优化设计框架。清华大学和大连交通大学结合铁路磁悬浮列车研究开发进行了研究。另外还有一些相关论文对 MDO 的理论探讨。我国的多学科设计优化技术研究已远远落后于国际水平。

综上所述,复杂产品的 CAD/CAM 一体化设计技术的研究与应用,加速了复杂产品的研制过程。但是,对于复杂产品设计领域来说,设计往往不但涉及控制、动力学、运动学,而且还涉及到部位安排、结构设计、强度分析,同时设计过程是一个不断迭代反馈的过程,设计过程中不但需要大量的领域知识、专家经验和技巧,还要进行大量的科学计算和分析。设计者既要考虑设计对象的结构特征、功能特征,又要综合设计对象的行为特征,在目前的 CAD/CAE/PDM 技术下是很困难的,必须采用新一代设计平台技术,才能突破现有“技术瓶颈”和信息“孤岛”。国外复杂产品设计的最新发展趋势是将多学科设计(MDD)、分析(MDA)、优化(MDO)集成一个大系统,为多学科分析、设计、优化提供了强有力的工具。复杂产品设计或分析要将所需的信息有机地组织起来,将各学科专业

的分析、设计和优化软件工具统一集成到一个环境内,最大限度地发挥软件工具的效能,保证新设计的复杂产品具有综合最优的高性能和高效能,同时可极大地缩短设计制造时间。

2 总体框架

复杂产品多学科协同设计仿真技术是一项复杂的综合技术,不能直接照搬其他应用领域的经验和成果,而是需要结合复杂产品设计领域自身的特点和实际需求,综合考虑通用性、有效性和可行性。为了支持复杂产品设计领域多学科协同设计仿真技术的规划、设计、实施和运行,需要为其提供一个系统的、通用的参考结构和技术框架。图 2 所示为复杂产品设计仿真平台的总体框架,由 3 个子平台和 1 个子系统组成。

1) 第 1 个子平台为协同设计平台,利用 STEP 标准实现不同设计工具之间的信息集成,利用 PDM 实现整个设计的文档管理、版本管理、结构管理、配置管理等,成员是指所有的异构设计工具,如 Solidworks, Pro/

E, Catia 等。

2) 第 2 个子平台为协同仿真平台,通过 HLA 标准实现不同仿真工具,联邦集成在一起,通过 RTI 实现协同实时仿真,成员是指所有的异构仿真工具,如 ADAMS, Ansys, Matlab 等。

3) 第 3 个子平台为协同优化平台,通过 DDF(Data Driven File)实现了不同设计与仿真工具和优化工具的集成,通过 FIPER 实现了异构协同优化设计,成员是指所用的设计、仿真工具,如 Pro/E, Ansys, Matlab 等。

4) 1 个子系统为联邦集成系统,利用本课题组提出的联邦集成架构(Federation Integration Architecture, FIA)、自主开发的联邦执行支撑系统(Federation Executive Infrastructure, FEI),实现了协同设计平台、协同仿真平台、协同优化平台多个异构平台联邦集成,达到了平台之间互联、互通和互操作。打破了以往的 CAD/CAE/CAO/PDM 系统之间的紧密集成的思想和方法。

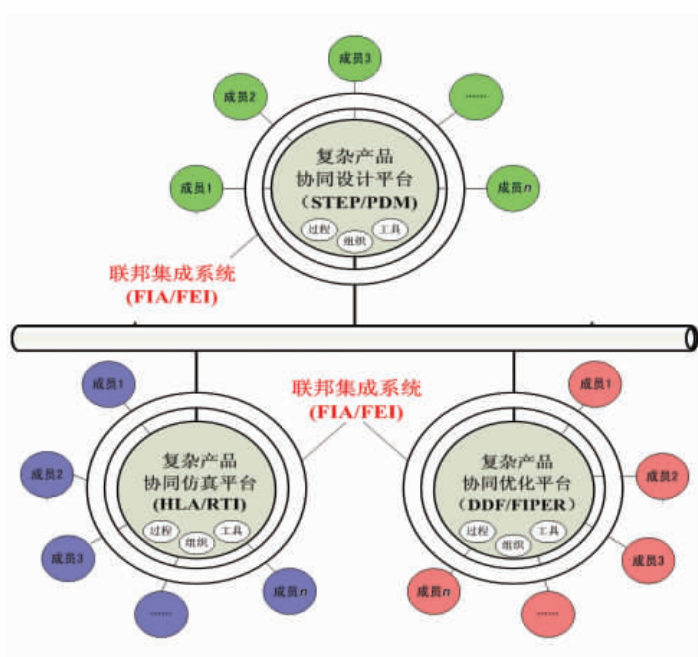


图 2 复杂产品设计仿真优化一体化平台总体框架

Fig. 2 Framework of simulated design optimization platform for complex products

3 三种协同平台

复杂产品设计仿真优化一体化平台总体框架中包括 3 个平台与 1 个联邦集成系统。协同设计、仿真、优化 3 个平台是完成数字化复杂产品设计开发必须的 3 个专业化平台,是现代计算机辅助设计技术、计算机辅助工程技术、计算机辅助优化技术发展 to 一定程度的结果,这 3 个平台为复杂产品数字样机、虚拟样机实现提供了必不可少的环境。

3.1 协同设计平台

CAD 技术已经成为设计中不可缺少的工具,而不同 CAD 系统之间的信息集成技术也得到了广泛的关注,基于 STEP 标准的产品信息集成技术已经走向了实用化。CAD 信息集成系统的原理模型包括知识重用部分与数据重用部分,二者的交集是复杂产品信息模型。复杂产品设计知识一方面通过二次开发模块在企业 CAD 系统内建立复杂产品的设计特征功能,另一方面,它被映射为复杂产品的信息模型,使复杂产品的设计知识可以信息模型的方式直接为后续产品开发服务。除了信息集成外,复杂产品设计平台必须有一个文件

级的应用集成环境,PDM 系统是建立一个协同设计的产品数据管理环境,实现信息共享及 CAD 系统和其他应用系统与 PDM 系统的集成,使产品数据得到全面管理。

图 3 所示为协同设计平台的体系结构。它基于 STEP 实现不同 CAD 系统之间产品模型的转换和数据映射,利用 PDM 系统解决复杂产品设计平台的组织/过程/工具之间的集成问题。

复杂产品协同设计平台具备了计算机辅助工业设计、计算机辅助结构设计等,支持复杂产品不同典型 CAD 系统之间的信息集成,可以实现复杂产品设计数据的集成管理,形成数字样机。但是,复杂产品设计仅有数字样机是不够的,必须通过仿真的手段,在计算机上验证产品的性能是否满足要求,因此,必须构造一个协同仿真平台来支持复杂产品仿真,支持形成复杂产品虚拟样机。

3.2 协同仿真平台

为了解决不同 CAE 系统之间产品模型转换和数据映射问题,首先要解决多学科协同建模的问题。多学科协同模型并不仅仅是单学科模型的简单组合。为了建立多学科协同模

型,除了单学科建模之外,还需要进行高层建模、学科模型转换、联邦集成与调试等多个过程。

目前对于高层建模技术的研究非常有限,通常是沿用军事领域的应用方法,其效果、通用性并不是很理想;对于如何将学科模型转换为协同仿真成员模型的方法研究不够;缺乏一种灵活有效的联邦集成方法。由于 HLA 标准本身比较复杂,底层开发过程对用户的要求较高,为了使得企业用户可以尽快地接受和掌握,多学科协同建模过程需要尽量尊重和保留用户现有的工作方式,对用户屏蔽繁琐的底层技术细节。另外,由于企业中已经积累的大量的学科模型和相关知识,建模过程中也必须考虑到这些既有资源的重用问题。

因此,本文提出一种有效的多学科协同建模方法,不仅可以实现整个建模过程的规范化和通用化,还提供对现有信息资源的重用机制,实现从传统的单学科仿真平滑过渡到基于 HLA/RTI 的多学科协同仿真。目前,HLA/RTI 只具有在局域网的支持协同仿真的功能,对于复杂产品仿真来说,不仅在局域网内,有可能在国内异地,甚至是国外异地协同仿真,尤其是与国外合作开发的产品,因此,本文提出了 Internet 上基于 HLA/WE_RTI 的复杂产品协同仿真平台,如图 4 所示。

复杂产品协同仿真平台具备了强度和刚度仿真、多体动力学仿真、空气动力学仿真、控制系统仿真、振动与噪声仿真等单领域仿真功能,支持复杂产品多领域仿真系统之间的协同仿真。但是,通过协同仿真得到的复杂产品虚拟样机仅是满足产品性能要求的可行解,要想提高产品性能,必须通过优化的手段,在计算机上进行优化设计,这样才能使得设计的虚拟样机最大限度地满足产品性能要求。

3.3 协同优化平台

随着 CAX 工具大规模使用,

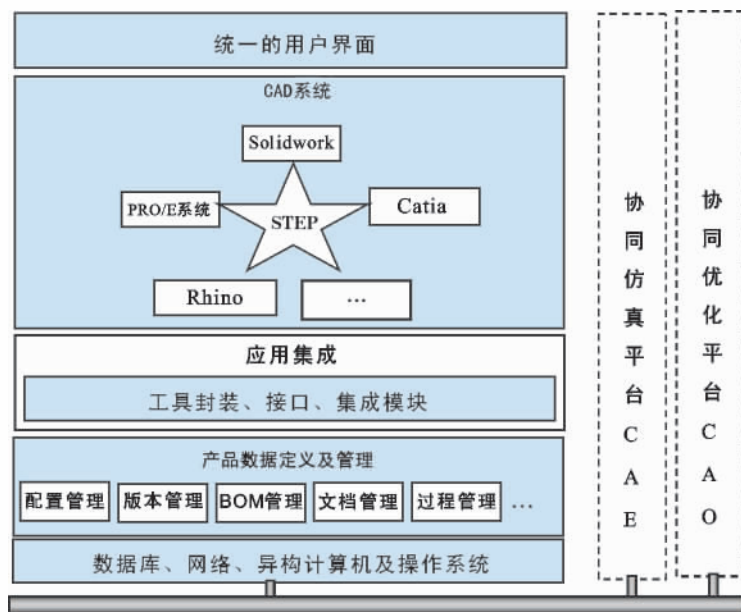


图 3 复杂产品协同设计平台的体系结构

Fig. 3 System architecture of collaborative design platform for complex products

CAX 信息孤岛局面日益突出,如何有效地将 CAX 数据和 CAX 流程统一管理,并融合 PDM 项目业务流程与 CAX 技术流程,已成为企业信息化的重要课题。遗憾的是,现有的 PDM 信息系统的解决方案均缺乏有效的把 CAX 过程(CAD 建模过程、CAE 仿真过程、CAO 优化过程)和 CAX 数据(CAD 数字模型、CAE 分析结果、CAO 优化方案)统一起来的功能;正是由于这些 CAD/CAO/CAE 数据、过

程和工具处于信息孤岛状态,造成了数字化样机设计过程低效率、结果数据难管理、产品设计性能欠优化,大大影响了产品面世速度和产品设计品质。研究一体化 CAX(CAD/CAE/CAO/MDO)过程管理和设计协同平台框架,如图 5 所示,采用数据驱动文件(Data Driven File),实现优化与仿真的信息交换,利用 FIPER(Federate Intelligent Product Environment)的分

布、合作智能产品环境,可使进行中的设计工作通过网络准确地访问存储在模型数据库里的产品数据,使参加综合设计的成员在不同的工作地点能够交互地进行合作;通过知识工程接口有效实现 CAD 产品建模过程、CAE 工程分析过程和 CAO 设计优化过程的关联;可以和企业 PDM 系统集成在一起,利用 CAE 开发平台从 PDM 系统调入原有的 CAD 模型和网格模型,同时把分析过程中的材料和测试数据、分析结果存到 PDM 数据库中,供以后或其他分析使用。

4 联邦集成系统

尽管设计、仿真、优化平台均属于复杂产品开发平台范畴,协同设计是协同仿真的基础,协同设计与仿真是协同优化的基础,但各平台功能比较独立,而且每个平台都是组织、过程、工具的集合体,建立一个十分紧密的无缝的设计、仿真、优化一体化集成平台,虽然便于实现统一管理,系统更新、升级更为方便,但是,紧密耦合平台需要高性能的软硬件支持、加大平台环境的投入,同时使用起来也不方便。因为,设计、仿真、优化在整体产品开发中的活动相对比较独立,如果用紧密集成的平台来完成,势必十分不方便。联邦集成模式是开发一个联邦运行支撑环境,安装在各平台之中,通过该系统实现各平台之间松耦合的、联邦形式的集成,平台之间不分大小、不分先后,地位完全平等,平台之间可以实现用户资源的互补性共享而不损害自己的利益。

联邦(Federation)是指用于达到某一特定复杂产品开发服务目的的分布服务系统,它由若干个相互作用的联邦成员(Federate)组成,而每个联邦成员则是一个具体的复杂产品开发平台或是一个参与联邦执行的应用系统。本文参考 HLA 和 Web Service 标准提出的联邦集成结构(Federate Integration Architecture, FIA)不是一个系统的实现,而是一种复杂产

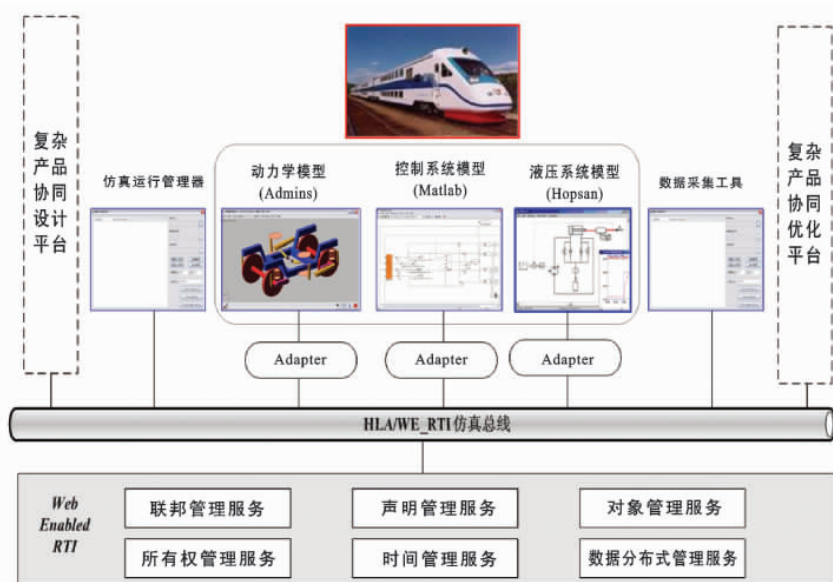


图 4 复杂产品协同仿真平台的体系结构

Fig. 4 System architecture of collaborative simulation platform for complex products

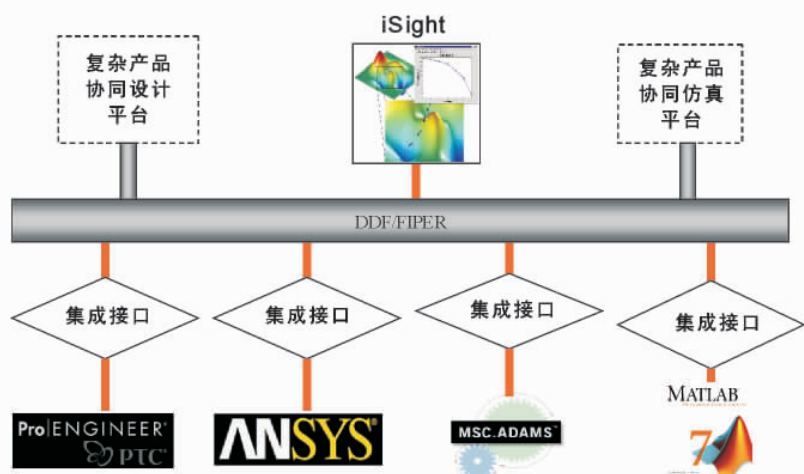


图 5 复杂产品设计协同优化平台的体系结构

Fig. 5 System architecture of collaborative optimization platform for complex products

品开发平台集成的框架体系标准,其目的是针对复杂大系统,提高复杂产品开发平台的集成服务的效率,促进平台之间的互操作,降低复杂产品开发平台建设的费用。FIA 特别重点解决的关键问题是要促进复杂产品开发平台之间的互操作。联邦运行支撑环境 (Federate Executive Infrastructure, FEI) 提供通用的、相对独立

的支撑服务程序,将平台应用同底层的支撑环境分开,即将具体的平台功能实现、平台运行管理和底层通信传输三者分离,隐蔽了各自的实现细节,从而使各部分可以相对独立地进行开发,并能充分利用各自领域的先进技术。因此,基于 FIA/FEI 的复杂产品协同仿真平台可参见图 6 所示。

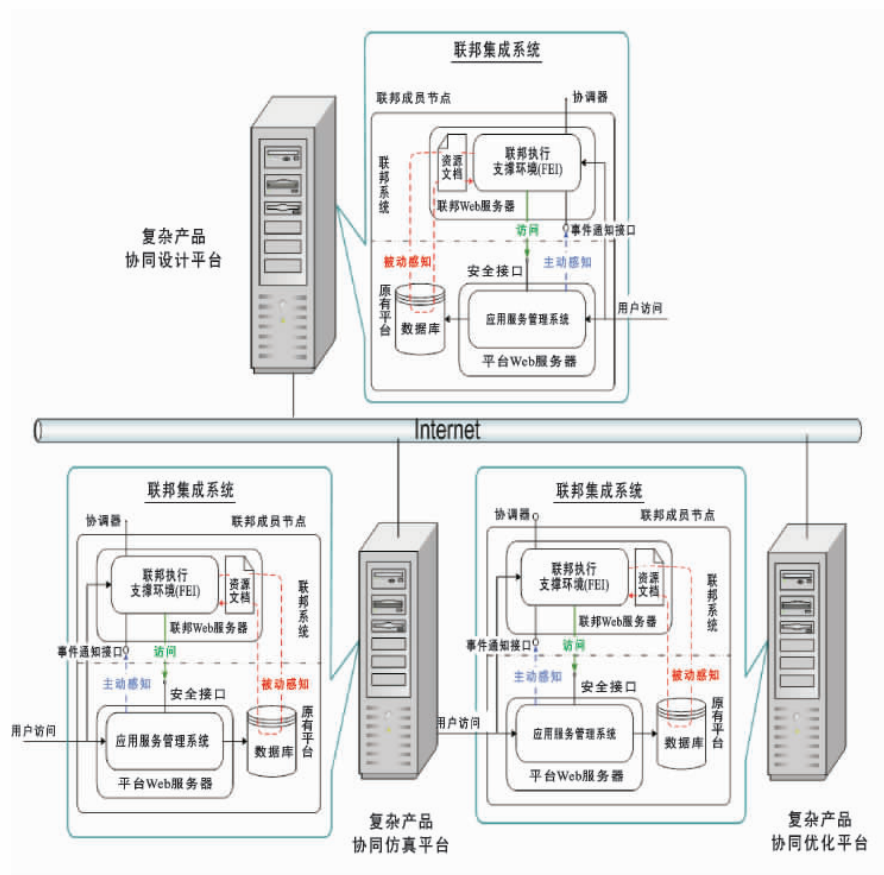


图 6 联邦集成系统结构图

Fig. 6 Integrated collaborative system

5 结论

利用 STEP/PDM 解决不同 CAD 之间的模型映射问题,提出了复杂产品协同设计平台;利用 HLA/WE_RTI 解决 CAD/CAE 数据和过程相融合的问题,开发复杂产品协同仿真平台;利用 DDF/FIPER 解决 CAD/CAE/CAO 之间的数据集成问题,开发复杂产品协同优化平台;利用 FIA/FEI 解决平台之间的集成问题,开发联邦集成系统,以实现复杂产品协同设计、仿真、

优化一体化集成平台,达到复杂产品设计组织、过程、工具的有机整合与协同。

参考文献 (References)

- [1] 熊光楞. 并行工程的理论与实践[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.
- XIONG Guangleng. Theory and practice of concurrent engineering. Beijing: Tsinghua University Press, 2001.
- [2] 熊光楞, 范文慧, 陈晓波. 复杂产品开发

的仿真技术 [J]. 系统仿真学报, 2004, 16(2): 194-201.

XIONG Guangleng, FAN Wenhui, CHEN Xiaobo. Simulation technology of complex product development [J]. Transaction of System Simulation, 2004, 16(2): 194-201.

- [3] GRUDIN J. Computer-supported cooperative work: History and focus [J]. IEEE Computer, 1994, 1994, 27 (5): 19-26.

- [4] KITAMUTA Y, YEE A, KISHINO F. A sophisticated manipulation aid in a virtual environment based on the dynamic constraints among object faces[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Canada, 1995.

- [5] 苟凌怡. 协同产品开发平台关键技术研究 [R]. 博士后出站报告. 清华大学, 2001.

GOU Lingyi. Study on key technology of collaborative product development platform [R]. Postdoctor Research Report. Tsinghua University, 2001.

- [6] 史美林, 杨光信. 计算机支持的协同工作: 过去现在和未来[J]. 计算机研究与发展, 1999, 36(增刊): 149-154.

SHI Meilin, YANG Guangxin. Computer supported collaborative work: Past, now and future[J]. Computer Research and Development, 1999, 36(Suppl): 149-154.

- [7] 林宗楷. 协同设计将对设计工作和 CAD 技术引起的变化 [J]. 软件学报, 1998, 9(增刊): 126-130.

LIN Zongkai. Change of CAD and design work by collaborative design. Transaction of Software, 1998, 9(Suppl): 126-130.

- [8] 黄业清, 乌兰木其, 邓家缙. 并行工程环境下基于黑板的多自治体协同设计[J]. 计算机集成制造系统, 1999, 5 (3): 49-54.

HUANG Yeqing, WU Lanmuqi, DENG Jiati. Multiagent collaborative design based on blackboard under concurrent engineering environment [J]. Journal of Computer Integrated Manufacturing System, 1999, 5 (3):

- 49-54.
- [9] 陆春进, 张友良, 王宏典. 面向并行工程的协同 CAD 系统的初步研究[J]. 机械科学与技术, 1998, 17(6): 1023-1025.
LU Chunjin, ZHANG Youliang, WANG Hongdian. Study on collaborative CAD system oriented concurrent engineering [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 1998, 17(6): 1023-1025.
- [10] 杨军, 李思昆, 郭阳. 基于分布式对象技术的 CAD 集成框架的模型与结构[J]. 国防科技大学学报, 1998, 20(2): 35-38.
YANG Jun, LI Sikun, GUO Yang. Model and architecture of CAD integration based distributed object technology [J]. Transaction of National Defence Science and Technology University, 1998, 20(2): 35-38.
- [11] 李志强, 尹佑盛, 詹捷, 等. 基于 AutoCAD 的异地协同设计系统的实现[J]. 重庆工学院学报, 2000, 14(1): 25-27.
LI Zhiqiang, YIN Yousheng, ZHAN Jie, *et al.* Implementation of distributed collaborative design system based on AutoCAD [J]. Transaction of Chongqing Polytechnical Institute, 2000, 14(1): 25-27.
- [12] 窦万峰, 詹永照, 谢立. 面向并行工程的协同设计系统研究[J]. 机械设计, 2000, 1: 43-48.
DOU Wanfeng, ZHAN Yongzhao, XIE Li. Study on collaborative design system oriented concurrent engineering [J]. Journal of Mechanical Design, 2000, 1: 43-48.
- [13] 张勇. 基于 Agent 协同设计系统的研究[J]. 武汉造船, 1999, 3: 42-44.
ZHANG Yong. Research on collaborative design system based on agent[J]. Journal of Wuhan Building Ship, 1999, 3: 42-44.
- [14] 胡晓兵, 殷国富, 罗阳. 基于 Agent 多协同作业的并行工程实施方法[J]. 机械, 1998, 25(5): 10-13.
HU Xiaobing, YIN Guofu, LUO Yang. Implement methodology of collaborative concurrent engineering based on agent [J]. Journal of Machine, 1998, 25(5): 10-13.
- [15] 裴云彰, 史元春, 徐光祐. 分布式计算模式下的协同设计系统[J]. 通信学报, 1999, 20(9): 4-9.
PEI Yunzhang, SHI Yuanchun, XU Guangyou. Collaborative design system under distributed computing mode [J]. Transaction of Communication, 1999, 20(9): 4-9.
- [16] 李敏波, 唐东, 成晔, 等. 基于 Web 的制造过程协同决策方法及其应用[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2000, 40(5): 16-19.
LI Minbo, TANG Dong, CHENG Ye, *et al.* Application and method of manufacturing process collaborative strategy based on web [J]. Journal of Tsinghua University, 2000, 40(5): 16-19.
- [17] 芮延年, 刘文杰, 郭旭红. 协同设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
RUI Yannian, LIU Wenjie, GUO Xuhong. Collaborative design [M]. China Machine Industry Press, 2003.
- [18] 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-CIMS, 2003, 9(增刊 1): 15-19.
WANG Keming, XIONG Guangleng. Collaborative design and simulation of complex product[J]. Journal of Computer Integrated Manufacturing System, 2003, 9(S1): 15-19.
- [19] XIONG Guangleng, CHEN Xiaobo. The co-simulation technology for complex product design [C]// Proceedings of Asian Simulation Conference. 2002.
- [20] BUKATA E, DAVIS D C, SHOMBERT L. The use of model-based test requirements throughout the product life cycle [J]. IEEE Aerospace and Electronics Systems Magazine, 2002, 15(2): 39-44.
- [21] KARANGELEN N E, HOANG N D T. Simulation based design for large complex computer based system[C]//Proceedings of Systems Engineering of Computer-Based Systems. 1994: 116-123.
- [22] CHIEROTTI M, ROZENBLIT J W, JACAK W. A framework for simulation design of flexible manufacturing systems [C]// Proceedings of the 23rd Conference on Winter Simulation. Phoenix, Arizona, United States, 1991: 1106-1114.
- [23] MEDEIROS D J, TRABAND M, TRIBBLE A, *et al.* Simulation based design for a shipyard manufacturing process [C]// Proceedings of the 32nd Conference on Winter Simulation. Orlando, Florida, United States, 2000: 1411-1414.
- [24] ECCLESTON M. Virtual prototyping[J]. Manufacturing Engineering, 1996, 6: 129-132.
- [25] PETERKIN R E, LUGINSLAND J W. A virtual prototyping environment for directed-energy concepts[J]. Computing in Science & Engineering, 2002, 4(2): 42-49.
- [26] PETRIU E M. Virtual prototyping tools for electronic design automation[J]. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, 1999, 6: 28-31.
- [27] MAGHNOUJI R, De VREEDE G J, VERBRAECK A, *et al.* Collaborative simulation modeling: experiences and lessons learned [C]//Proceedings of the 34th Hawaii International Conference on System Sciences. Hawaii, USA, 2001: 88-97.
- [28] Special section on Complex Systems[J]. Science, 1999, 284(5411): 79-109.
- [29] ARAUJO F W, HIRATA C, YANO E. GroupSim: A Collaborative environment for discrete event simulation software development for the world wide web[J]. Simulation, 2004, 80(6): 257-272.
- [30] NINIOS P, VLAHOS K, BUNN D W. OO/DEVS: A platform for industry simulation and strategic modeling [J]. Decision Support Systems, 1995, 15(3): 229-245.
- [31] GOTTLIEB E J, McDONALD M J. The umbra simulation framework as applied to building HLA federates

- [C]//Proceedings of the 2002 winter simulation conference, 2002, 981 – 989.
- [32] MCQUAY W K. A collaborative engineering environment for 21st century avionics [C]//Aerospace conference. IEEE, 1998.
- [33] LOCKHEED M. SAVE Team[R]. Simulation assessment validating environment: Architecture plan (MSSP), 2000.
- [34] HARRISON J P, CHRSTENSEN B, BIANCO J, *et al.* Virtual collaborative simulation environment for integrated product and process development [C]// Proceedings of 5th IEEE international symposium, High performance distributed computing, 1996: 19–22.
- [35] 柴旭东, 李伯虎, 熊光楞, 等. 复杂产品协同仿真平台的研究与实现 [J]. 计算机集成制造系统 – CIMS, 2002, 8 (7): 580–584.
- CHAI Xudong, LI Bohu, XIONG Guangleng, *et al.* Research and implementation on complex product collaborative simulation platform [J]. Journal of Computer Integrated Manufacturing System, 2002, 8 (7): 580–584.
- [36] 柴旭东. 基于协同仿真与并行工程的复杂产品虚拟样机技术研究[R]. 博士后出站报告. 清华大学, 2001.
- CHAI Xudong. Study on collaborative simulation and concurrent engineering based complex product virtual prototype [R]. Postdoctor research report. Tsinghua University, 2001.
- [37] 陈晓波. 面向复杂产品设计的协同仿真关键技术研究 [D]. 博士学位论文. 清华大学, 2003.
- CHEN Xiaobo. Study on key technology of collaborative simulation oriented complex product [D]. Doctor dissertation. Tsinghua University, 2003.
- [38] 蹇佳. 面向复杂产品的多领域建模与仿真技术研究[D]. 硕士学位论文. 清华大学, 2004.
- JIAN Jia. Multidomain modeling and simulation oriented complex product [D]. Master dissertation. Tsinghua University, 2004.
- [39] 王克明. 多学科协同仿真平台的研究与开发 [D]. 博士学位论文. 清华大学, 2005.
- WANG Keming. Research and development of multidisciplinary collaborative simulation platform [D]. Doctor dissertation. Tsinghua University, 2005.
- [40] 林宇. 基于HLA的协同仿真技术研究与实现[D]. 硕士学位论文. 清华大学, 2006.
- LIN Yu. Research and development of HLA based collaborative simulation [D]. Master dissertation. Tsinghua University, 2006.
- [41] BENDSOE M P, KIKUCHI N. Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method [J]. Comput Methods Appl Mech Eng, 1988, 71: 197–224.
- [42] 陈柏鸿, 肖人彬, 刘继红, 等. 复杂产品协同优化设计中耦合因素的研究 [J]. 机械工程学报, 2001, 37(1): 19–23.
- CHEN Baihong, XIAO Renbin, LIU Jihong, *et al.* Study on coupling factor of complex product collaborative design [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2001, 37(1): 19–23.
- [43] 陈树勋. 基于人工智能的机械系统多学科优化探讨 [J]. 现代工程制造, 2004, 5: 11–13.
- CHEN Shuxun. Discuss on multidisciplinary design optimization of mechanical system based artificial intelligence [J]. Modern Engineering Manufacturing, 2004, 5: 11–13.
- [44] AIAA White Paper. Current state of the art: Multidisciplinary design optimization [R]. AIAA MDO Technical Committee, 1991.
- [45] 郭健. 多学科设计优化技术在空间飞行器总体优化中的应用 [C]//中国宇航学会空间飞行器总体技术 2000 学术交流文集, 2000.
- GUO Jian. Multidisciplinary design optimization applied in space aircraft [C]// Proceedings of society of China aerospace aircraft design, 2000.
- [46] SALAS A O, TOWNSEND J C. Framework requirements for MDO application development [R]. AIAA–98–4740, 1998.
- [47] 陈琪锋. 飞行器分布式协同进化多学科设计优化方法研究 [D]. 博士学位论文, 国防科学技术大学, 2005.
- CHEN Qifeng. Multidisciplinary design optimization of aircraft distributed collaborative evolution [D]. Doctor dissertation. National Defence Science and Technology University, 2005.
- [48] 龚春林. 多学科设计优化技术研究 [D]. 硕士学位论文. 西北工业大学, 2004.
- GONG Chunlin. Study on multidisciplinary design optimization [D]. Master Dissertation. Northern Polytechnical University, 2004.
- [49] 陈小前. 飞行器总体优化设计理论与应用研究 [D]. 博士学位论文, 国防科学技术大学, 2001.
- CHEN Xiaoqian. Study on theory of aircraft optimization design [D]. Doctor Dissertation. National Defence Science and Technology University, 2001.
- [50] 蔡苗. 多学科设计优化分布式计算环境的研究 [D]. 硕士学位论文, 南京航空航天大学, 2003.
- CAI Miao. Study on distributed computing environment of multidisciplinary design optimization [D]. Master Dissertation. Nanjing Aerospace and Astronaut University, 2003.
- [51] 薛飞. 飞行器设计的协同优化方法及其计算环境研究 [D]. 硕士学位论文, 南京航空航天大学, 2004.
- XUE Fei. Study on computing environment and collaborative optimization of aircraft [D]. Master Dissertation. Nanjing Aerospace and Astronaut University, 2004.
- [52] 郭健. 多学科设计优化技术研究 [D]. 硕士学位论文, 西北工业大学, 2001.
- GUO Jian. Study on multidisciplinary design optimization [D]. Master dissertation. Northern Polytechnical University, 2001.

(责任编辑 赵佳)