复杂工程系统综合设计优化环境

王振华 邓家褆 隋鹏飞 王永坡

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院，北京 100083)

摘 要：建立了系统整合、流程统一、参数优化、协同设计的综合设计优化环境.通过分析复杂工程系统的特点，建立了具有高可扩展性的多层体系架构.阐述了组成该环境的4个关键模块：项目组织与管理模块，保证项目进度和质量；以设计结构矩阵为表达形式、以工作流参考模型为运行机制的过程建模与执行模块，提供跨部门的任务流转；基于组件技术，实现人员、数据和工具在网络上紧密集成的设计任务单元模块，为系统设计提供简洁一致的任务模型；以产品数据管理(PDM，Product Data Management)为信息基础结构的产品数据模型，提供单一数据源.最后给出了技术实现和运行机制.该环境的原型系统已成功地经过了气动、结构、控制和总体设计等领域的设计与优化技术测试试验.

关 键 词：计算机辅助设计；过程控制；项目管理；分布式计算系统

中图分类号：TP 12

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2007)02-0192-05

Complex engineering system synthesis design optimization framework

Wang Zhenhua Deng Jiati Sui Pengfei Wang Yongpo

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Synthesis design optimization environment was built for system integration, process unification, parameter optimization and collaborative design. The high extensible and multi-tiered architecture of this environment was built on the analysis of characteristic of complex engineering system. Four key modules were discussed: project organization and management module guarantees project schedule and quality; process modeling and running module applies design task structure for representing design processes, workflow reference model for running, and provides the ability of task transition across organization; design task unit based on component technology integrates people, data and tool over network, and provides a coherent task model for system design; product data model uses PDM(product data management) as information infrastructure, and provides a single representation of product. The implementation of the environment and running mechanism were presented. The prototype of this environment has been successfully tested by the design and optimization experimentations in fields of pneumatics, structure, control and system design.

Key words: computer aided design; process control; project management; distributed computing system

复杂工程系统(如导弹、卫星、航空发动机等)的研发通常涉及众多的工程人员、海量的数据资源、不同领域的软件工具以及复杂的设计流程，是一个需要经过多个设计阶段逐步细化的、反复的过程，是人员、资源、工具和过程的综合[1].传统的设计方法和单一的计算机辅助设计软件往往只是针对特定的领域，缺乏与其它软件共享数据、进行通信的能力，已经不能胜任目前复杂工程系统和产品的开发.因此，为了适应这些特点，当前设计领域研究的重点已经从单一的计算机辅助设计软

收稿日期：2006-03-16

作者简介：王振华(1978—)，男，陕西汉中人，博士生，icarus_wzh@sohu.com.

件向多层次、多领域的集成化设计支持环境转变[2].

本文提出的综合设计优化环境(SDOF,Synthesis Design Optimization Framework)就是这样一种支持复杂工程产品设计的集成环境,其目的是通过现代计算机和网络技术将人员、资源、工具和过程在网络上实现紧密集成,使得过程链中的每一个应用程序产生的数据和电子文档都可以在不同的步骤间无缝地传递,从而进行设计的协同、学科的集成和优化,并实现设计过程驱动下的设计推演,完成在正确时间将正确的信息提供到正确的地点上,最终获得正确的决策、实现企业的整体目标.

1　复杂工程系统的特点

在过去的几十年内,处于技术前沿的大型而高度交互作用的复杂工程系统与日俱增,在航空、航天、汽车等领域尤为如此.这些系统普遍具有的特点是:

1) 具有复杂的层次结构;

2) 需要先进的科学技术以及利用遍布各地的设计团队、组织机构的技术能力;

3) 涉及多个学科领域、多种类型的联合仿真,需要工程设计、分析和优化技术的有机结合;

4) 涉及复杂的管理技术,包括各类数据、模型、工具、人员以及过程的管理[3].

综合设计优化技术针对这些特点,提出一种高效的解决方案:通过采用先进的计算机和网络技术,充分利用计算机辅助设计技术、仿真技术和产品生命周期管理技术,结合工程优化方法,建立系统整合、流程统一、参数优化、协同设计的综合设计优化环境,全面提升企业的产品开发技术水平,提高产品第一时间设计质量和第一时间运行质量,降低研制成本.

2　综合设计优化环境的体系架构

2.1　系统的功能框架

综合设计优化环境(SDOF)为工程师和管理人员提供一个高效的、协同的设计环境,支持设计人员之间及设计人员与环境之间的通讯与交互,保证设计过程中各设计阶段产品数据的一致性,允许设计人员利用各自的设计工具和设计资源参与产品开发.其功能框架如图 1 所示.

在 SDOF 功能框架中,项目组织与管理主要关注在整个项目指标控制下如何有效组织项目,

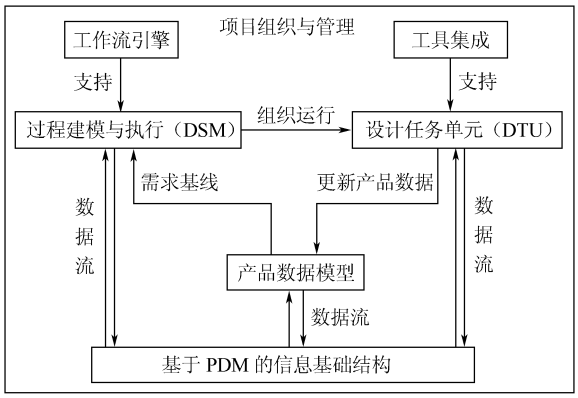

图 1　SDOF 的功能框架

保证项目进度和项目质量.项目组织与管理在整个设计中处于统领地位,对设计过程的监控是其手段之一.

以设计结构矩阵[4](DSM,Design Structure Matrix)为表达形式的设计过程是以创建产品数据模型为目的的.基于产品功能产生的产品需求基线是 DSM 建立的目标依据.根据产品需求基线,DSM 将设计问题分解成多个设计任务单元(DTU,Design Task Unit),并对单元的逻辑关系和时序关系进行描述和规划.

一旦定义好 DSM,其流程严格由工作流引擎驱动.工作流引擎可以快速启动一个 DSM 过程,并为 DSM 中的 DTU 分配执行人员,下发任务通知.DTU 在接收到工作流的控制指令以后,通过工具集成,组织资源,调用工具,发布设计结果,并与其它任务单元进行协同.最后,经过验证的设计结果数据可以用于产品数据的更新.

产品数据管理(PDM,Product Data Management)提供对产品数据有效地、有规则地存取、管理和控制机制,在整个设计过程中,起着重要的数据支撑作用.

2.2　系统的体系架构

复杂工程系统的开发是一个由设计过程和相关学科组成的且随时间变化的生命周期问题,不可能靠一种或几种设计分析工具解决.因此,SDOF 提供一套完整的、先进的设计集成框架来支持设计过程中的多个专业模型与应用的集成设计、分析和优化,如图 2 所示.

SDOF 框架包括多个不同的层次,主要有:

1) 用户层,包括建立设计任务单元和设计结构矩阵所需的用户界面,进行过程的定义、设计问题的定义、数据可视化等操作;

2) 组件服务层,包括各种资源管理、工作流、优化代理、工具封装等服务;

3) 数据服务层,包括各种数据库、PDM 系

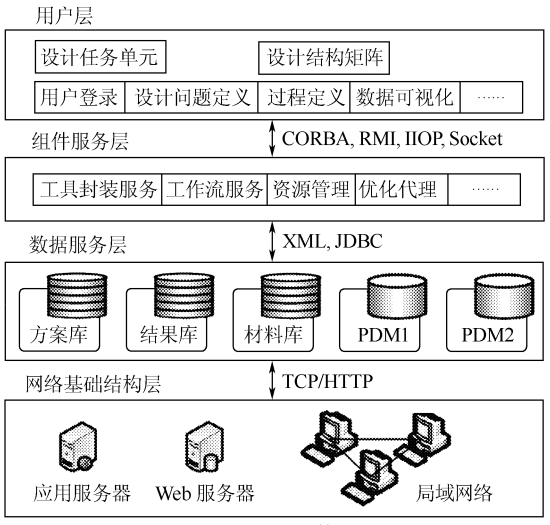

图 2 SDOF 的多层体系架构图

统；

4）网络基础结构层，由应用服务器、Web 服务器和若干个客户端构成的局域网络.

3 综合设计优化环境的关键模块

3.1 项目组织与管理

产品开发项目（PDP，Product Design Project）可形式化描述为

$$M(O,T,C,R,P,\text{Role})=M(\{\text{SP}i\},\text{PL})$$

即 PDP 可以通过项目目标 O、项目时间 T、项目成本 C、项目资源 R、项目规划过程 P 以及项目人员角色 Role 6 个方面的有机协调来看待. 产品开发项目本身具备分解特征，它可以分解为一系列的子项目（SP，Sub Project）及其彼此之间的关系（PL，Project Link）. 项目及子项目会带有与自身相适应的工程产品设计过程，并在给定的项目目标及其它项目指标下，配置相应过程、资源、人力等.

3.2 过程建模与执行

设计结构矩阵可以提供一种简洁而可视的形式表达复杂系统的设计过程模型. 图 3 是一个设计结构矩阵的例子. 其中，矩阵的行和列对应设计活动；主对角线元素代表设计活动的本身；其它元素用以表示活动之间的关系；其中每一行表示该行所对应任务对其它各行任务的支持信息；每一列表示该列所对应任务的完成需要其它各列任务的支持信息.

在 DSM 中，任务之间存在 3 种交互关系. 如图 3 所示，任务 1 和任务 2 之间是并行关系，它们之间没有信息传递，彼此独立；任务 3 和任务 4 是串行关系，它们之间存在顺序的信息转换；任务 6 和任务 7 是耦合关系，它们之间彼此依赖.

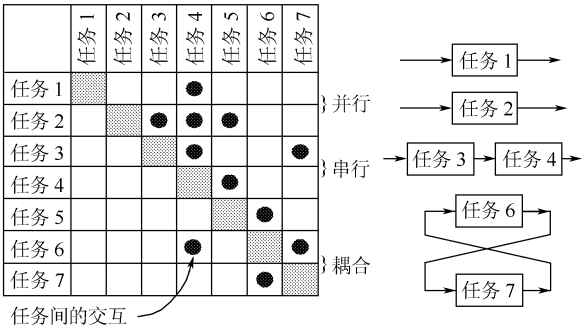

图 3 设计结构矩阵示例

在 SDOF 中，为了使 DSM 描述的过程模型能够被计算机理解和执行，还需要用标准的流程定义语言来描述. 现在比较通用的而且灵活的语言是工作流定义语言（XPDL，XML Process Define Language），它是基于可扩展置标语言（XML，eXtensible Markup Language）的可扩展流程定义语言，可以在此基础上扩展所需要的功能，例如设计信息和文档的传递、产品数据的管理等. 同时，基于符合工作流管理联盟（WfMC，Workflow Management Coalition）的工作流参考模型[5]和对象管理组织（OMG，Object Management Group）发布的基于 CORBA 的分布式运行协议，为 DSM 的执行、监控、互操作和管理提供标准接口，支持条件、等待、跳转、分层等复杂设计过程，为整个设计提供跨部门的任务流转.

3.3 设计任务单元

设计任务单元的目的是通过现代计算机和网络技术将人员、数据和工具在网络上实现紧密集成，并进行统一的管理和描述，为系统提供一种简洁一致的任务模型，从而建立工程产品研发流程中的基本组织单元，满足工程产品设计的协同性、集成性和网络化要求.

在设计任务单元中，任何工具都必须通过封装才能实现与设计任务单元的集成（见图 4）. 其中，消息服务网络为不同的工具和服务提供通信的桥梁；数据库和数据集成服务提供共享的数据

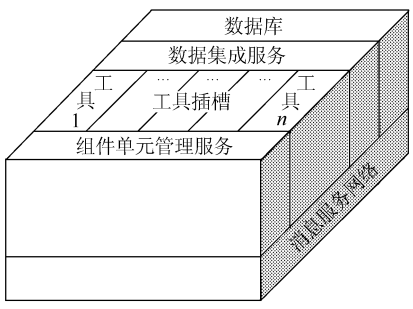

图 4 设计任务单元中的工具封装

空间;组件单元管理服务控制各种不同工具组件高效地完成协同作业.组件化的封装使不同的工具软件得到统一的描述和管理,为使用者提供一个简洁一致的视图进行集成.

一般情况下,工具的封装方式包括:输入/输出文件、专有软件接口(Excel,Matlab 等)、脚本接口等.同时为了满足工程优化的需要,设计任务单元中还提供多种优化方法,包括各种数值型优化算法(单纯型法、外点罚函数法等)和演化算法(遗传算法、模拟退火算法等),并提供开放的优化接口,以便集成各种不同的优化器.

3.4　产品数据模型

产品数据模型是 SDOF 环境中一个关键组件.为了支持复杂工程系统开发过程,在 SDOF 中采用层级的结构描述产品,其中每一级上定义有关键特征属性,该层次结构从高到低可以分解为系统、子系统、装配体和零件.其中,系统是对产品最高层的描述,定义了复杂产品功能层次上的属性,相当于项目论证阶段;子系统主要定义复杂产品的各个子系统所拥有的属性以及各子系统之间的相互关系,相当于概念设计阶段;装配体是对复杂产品装配体主要属性的定义和描述,是详细设计所产生的结果;零件是对复杂产品中不可再分的、可都独立加工制造的单元定义,是制造实施过程的产物.SDOF 的服务组件支持以这种方式定义任何一种产品模型.同时,系统服务还支持产品模型的扩展,可使得用户随着产品开发的进行不断完善和扩展其产品结构.

因此,在 SDOF 中,通过以项目管理为引导项,以产品项目结构为骨架,将产品设计过程与产品结构模型等集成为系统整体模型运行,从而可形成覆盖产品生命周期各个阶段的集成系统.

4　系统的实现和运行

SDOF 的目标是支持协作者之间既分工又合作的工作机制.为了达到这一目标,首先需要集成异构环境下的资源,提供通用的信息交换服务,同时保证协同设计过程中数据的一致性要求.在技术解决方案中,采用 CORBA 作为分布式对象处理技术,采用 XML 作为信息交换的标准,采用 SmarTeam(PDM 系统)作为数据管理的基础结构,采用符合 WfMC 的工作流参考模型标准,同时为了适应跨平台的要求,整个系统采用 JAVA 作为开发语言.

以卫星总体设计为例,来说明整个系统的运行过程(见图 5).卫星总体设计包括多个子系统的设计:有效载荷系统、推进系统、电源系统、通信系统等.其中每一个系统都需要多种工具的支持.首先通过 DSM 对总体设计过程进行描述和规划,并将结果发布到工作流服务器上,由工作流引擎驱动整个过程的运行.

在卫星总体设计中,工作流引擎首先驱动有效载荷任务单元运行.在该任务单元运行之前,首先需要进行前处理操作,包括从 PDM 中检出相关数据,判断运行条件,进行文件传输等.如果该设计任务单元满足所有运行条件,则立即启动其内部基于数据流的过程引擎,按用户配置的工具执行过程进行自动化求解运算.一旦有效载荷设计任务单元运算完毕就可以进行后处理操作,包括将计算结果检入到 PDM 中,生成总结报告,进行文件传输,向工作流引擎提交完成信息等.工作流引擎在接收到设计任务单元传来的完成信息后,按照 DSM 过程模型中定义的设计任务单元的执行顺序,驱动下一任务单元(推进系统)运行.如此反复,直到整个设计过程完毕.在这一过程中,一个设计任务单元有可能不止运行一次,有时会根据实际需要,在过程模型中设置任务跳转(比如进行系统寻优).工作流引擎根据跳转的路径,反复调用回路上的任务单元,直到满足终止条件为止(找到最优解).目前该环境的原型系统除了

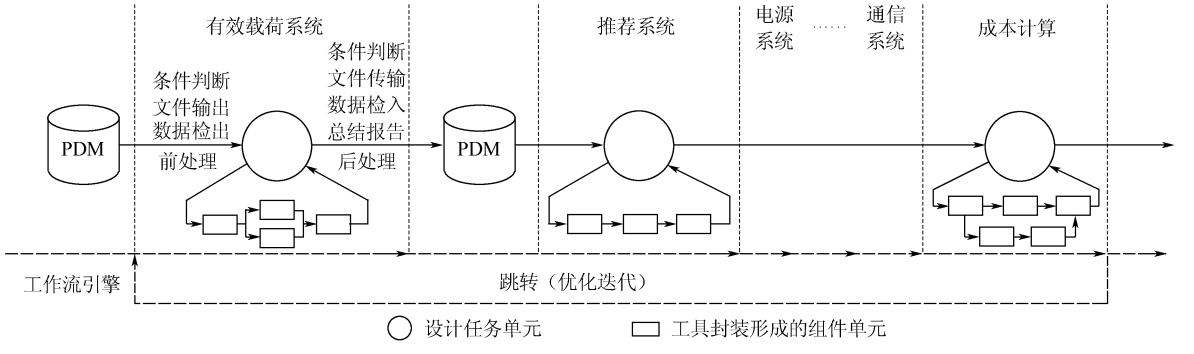

图 5　SDOF 支持下的卫星总体设计

经过卫星总体设计实例的验证之外，还成功地经过了气动、结构、控制等领域的设计与优化技术测试试验.

5 结束语

在SDOF平台中，所采用的一系列高级的计算机和网络技术，使得平台具有较高的扩展性，从而满足地理上分布式的、合作的企业、组织、团队和人员有效地进行复杂工程系统的协同设计与优化. 其中，单一的基于PDM系统的产品数据模型保障了产品数据的一致性；基于工作流引擎驱动的、以DSM形式表达的过程建模与执行模块使得过程的建立变得更加高效. 设计任务单元提供的人员、数据和工具的集成能力，使得企业在数据共享和交换、资源整合、工具集成等方面上得到了实质性的提高.

综上所述，SDOF是设计协同、过程管理、分析集成、参数优化、资源整合的软件环境，可以大大提高复杂工程系统开发的整体协作能力，从而为数字化设计平台的集成管理提供高效的解决方案.

参考文献（References）

[1] Randall M H, Steve W J, Scott W P, et al. A distributed software environment for aerospace product development [R]. AIAA-99-1360, 1999

[2] Kolonay R M. Functional requirement for next generation engineering analys is and design integration environments [C]//Soolewski M, Ghodous P. Proceeding of the 12th ISPE International Conference on Concurrent Engineering. Texas: ISPE, 2005: 3－12

[3] 张和明，熊光楞. Web的多学科协同设计与仿真平台及其关键技术[J]. 计算机集成制造系统-CIMS, 2003, 9(8): 704－709
Zhang Heming, Xiong Guangleng. Web-based multidiscipline collaborative design and simulation plateform [J]. Computer Integratead Manufacturing Systems-CIMS, 2003, 9(8): 704－709(in Chinese)

[4] Browning T R. Applying the design structure matrix to system decomposition and integration problems: a review and new directions [J]. IEEE Transactions on Engineering Management, 2001, 48(3): 292－306

[5] 范玉顺. 工作流管理技术基础[M]. 北京：清华大学出版社, 2001: 54－78
Fan Yushun. The basis of workflow management technology [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001: 54－78(in Chinese)

(责任编辑：文丽芳)

(上接第183页)

参考文献（References）

[1] Bead R W, Timothy W M, Goodrich M A, et al. Coordinated target assignment and intercept for unmanned air vehicles[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2002, 18(6): 911－922.

[2] Lee Z J, Su S F, Lee C Y. Efficiently solving general weapon-target assignment problem by genetic algorithms with greedy eugenics[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics - Part B, 2003, 33(1): 113－121

[3] 余舟毅，陈宗基，周锐. 基于遗传算法的动态资源调度问题研究[J]. 控制与决策, 2004, 19(11): 1308－1311
Yu Zhouyi, Chen Zongji, Zhou Rui. On dynamic resource scheduling based on genetic algorithm[J]. Control and Decision, 2004, 19(11): 1308－1311(in Chinese)

[4] Abrahams P, Balart R, Byrnes J S, et al. Maap: the military aircraft allocation planner[C]//Evolutionary Computation Proceedings of the IEEE World Congress on Computational Intelligence. Anchorage, USA: IEEE Press, 1998: 336－341

[5] Palmer D, Kirschenbaum M, Zajac K, et. al. Decentralized cooperative auction for multiple agent task allocation using synchronized random number generators[C]//Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ Intl Conference on Intelligent Robots and Systems. Las Vegas, Nevada: IEEE Press, 2003: 1963－1968

[6] 夏洁，高金源. 满足战场需求的实时飞行路径规划[J]. 北京航空航天大学学报, 2004, 30(2): 95－99
Xia Jie, Gao Jinyuan. Real-time flight path planning for combat mission[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004, 30(2): 95－99(in Chinese)

(责任编辑：娄　嘉)