支持数字样机设计的集成设计信息建模

肖立峰

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院，北京 100191)

摘　　要：以产品仿真模型及其设计活动为主要控制对象，研究面向数字样机的产品设计信息建模的特点，并建立了支持数字样机设计的集成设计信息模型. 将产品设计控制对象抽象为反映产品静态特性和动态特性的信息元及反映产品设计活动的设计元. 从产品几何仿真、物理仿真和行为仿真三方面建立数字样机对象信息模型；以设计树对象、设计角色对象和资源配置对象建立设计过程控制信息模型. 以此为基础建立面向数字样机的分布式产品协同设计仿真环境.

关　键　词：产品设计；设计过程；计算机仿真

中图分类号：TP 391.9

文献标识码：A　　**文 章 编 号**：1001-5965(2009)02-0201-04

Information modeling of product design process for virtual prototyping

Xiao Lifeng

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: To control the various simulation models and design activities, the features of information modeling of virtual prototyping design were discussed, and an integrated information model was proposed. Product design object was abstracted as property unit of static and dynamic characters and operating unit. Virtual prototyping information model was expressed from product geometry, physics and behavior. Design process information model was formalized with the control of design tree object, design role object and resource configuration object. This information model was used successfully in the construction of distributed collaborative simulation environment (DCSE).

Key words: product design; design process; computer simulation

由于现代工程产品日趋复杂，支持产品设计的信息建模研究由单独的产品建模扩展到融合过程的集成设计建模. 基于产品的建模，文献[1]设计开发了基于 STEP 的产品互操作工具，文献[2]提出全息产品模型；基于过程的建模，文献[3]构建多代理协作设计系统；基于产品和过程集成的建模，文献[4]提出一种融合产品静态特性信息和动态演变信息的集成化产品模型框架. 近来，以仿真技术为特点的数字样机技术成为产品设计过程的新特点. 文献[5]认为数字样机技术是以产品领域知识为驱动，以三维数字化设计技术为手段，面向产品自上向下自主开发全过程的支持技术. 基于数字样机技术的产品设计过程强调系统和产品全生命周期的观点，支持产品全方位测试、分析与评估、强调不同领域虚拟协同设计. 本文针对数字样机技术特点，对设计信息进行建模，以支持面向数字样机的产品设计过程的管理和控制.

1　数字样机设计信息建模的特点

面向数字样机的产品设计过程中，孤立的仿真模型不能完整地描述产品过程，而独立的过程信息也不能控制仿真模型向最终产品演变. 必须由两者信息集成来控制设计过程和模型状态的演变. 集成设计信息建模反映如下几方面特点.

收稿日期：2008-07-20

基金项目：国家 863 计划资助项目(2005A742050)

作者简介：肖立峰(1969－)，男，湖南益阳人，副教授，xiaolifeng@buaa.edu.cn.

时间相关性. 从设计过程来说,设计活动是时间相关的,而且只能前向资源分配,或缩短所占用的时间资源,从而控制过程符合时间资源约束. 从仿真模型来说,许多模型也是时间的函数,大量仿真单元运行也产生大量时间开销.

参数相关性. 数字样机在各种仿真模型支持下,最大程度近似物理样机,驱动产品的全局优化设计. 该过程往往需要通过各种参数约束关系决定各种接口关系,实现各种模型的数据耦合.

事件驱动. 从设计过程来看,设计活动是基于事件驱动的. 如协同设计中的各种邀约事件、授权事件和文档提交事件等. 从仿真模型来看,激励作为输入事件,将驱动系统产生相应的输出响应,从而影响仿真系统的行为表现.

多形态样机控制模式. 为支持组件模型之间信息交互,往往需要构建反映信息耦合关系的多形态样机模型,比如概念模型、原理模型及近似模型等. 通过设计活动,逐步完成由近似表示到精确模拟的转变,形成符合设计目标的数字样机. 多形态样机控制模式需要动态调整,以控制设计活动的发展趋势.

2 数字样机设计信息模型的构建

支持数字样机的产品设计过程建模需要以系统全局观点,在产品全生命周期内通过各种基本信息单元实现设计数据的耦合,形成以多形态仿真模型为核心的数字样机对象模型和产品设计控制策略,以控制产品模型的生成和演变. 图1反映了数字样机设计的信息建模思想.

2.1 集成化产品设计信息建模

产品对象模型包括产品对象主模型和领域模型[2,4]. 产品对象主模型包含对产品静态特性和动态特性的描述,领域模型是主模型在各领域的映像,反映产品在不同领域对产品的要求.

产品静态信息元是产品所有功能特征属性集合的抽象,描述为 $O_s=(S_{Name},S_{Type},S_{Value})$,$S_{Name}$ 表示属性名称,S_{Type} 表示属性类型,S_{Value} 表示属性值. 产品静态信息模型 P_o 是产品静态信息元在几何拓扑、形状特征、公差配合、材料、零部件和产品特性等方面进行属性配置的结果,反映产品在设计、装配、操作和约束等方面的静态特性[4]. 描述为 $P_o=(O_{id},V_{id},O_s,O_c,O_f)$,即由模型标识 O_{id}、版本标识 V_{id}、模型的属性集 O_s、约束集 O_c 和模型设计方法 O_f 构成.

产品动态信息元是产品在特定领域中对某种激励产生响应的行为特征抽象. 描述为 $O_d=(S_X,M_d,S_Y)$,S_X 表示模型输入激励,M_d 表示动态模型,S_Y 表示模型输出响应. 产品动态信息模型 P_d 是产品动态信息元在特定领域的动态仿真实例的集合. 描述为 $P_d=(O_{id},V_{id},O_d,O_c,O_f)$.

对象主模型是产品静态模型和动态模型的并,描述为 $P_m=(P_o\cup P_d)$. 体现产品设计过程中静态信息和动态信息的融合. 领域模型是产品对象主模型在不同应用领域的模型映射,如概念模型、原理模型、分析模型、制造模型和维修模型等. 领域对象模型通过主模型信息抽取(F_e)和补充(F_c)的结果[4]. 描述为 $P_a=F_e(P_m)\cup F_c(P_m)$.

产品设计元是产品设计过程中,对产品对象主模型进行设计操作的基本单元. 描述为 $F_m=(F_{mid},\Psi,P_m,P_m',F_{mc})$,$P_m'=\Psi(P_m)$,由操作标识符 F_{mid},操作函数 Ψ,源模型对象集 P_m,结果模型对象集 P_m' 和约束集 F_{mc} 构成,表示作用于 P_m 上,并使之变化的基本操作. 所有设计元实例的集合记录了主模型创建和演变的历史过程.

2.2 数字样机对象信息模型

在数字样机设计环境下,产品对象主模型和领域模型体现为产品在几何、物理和行为等方面

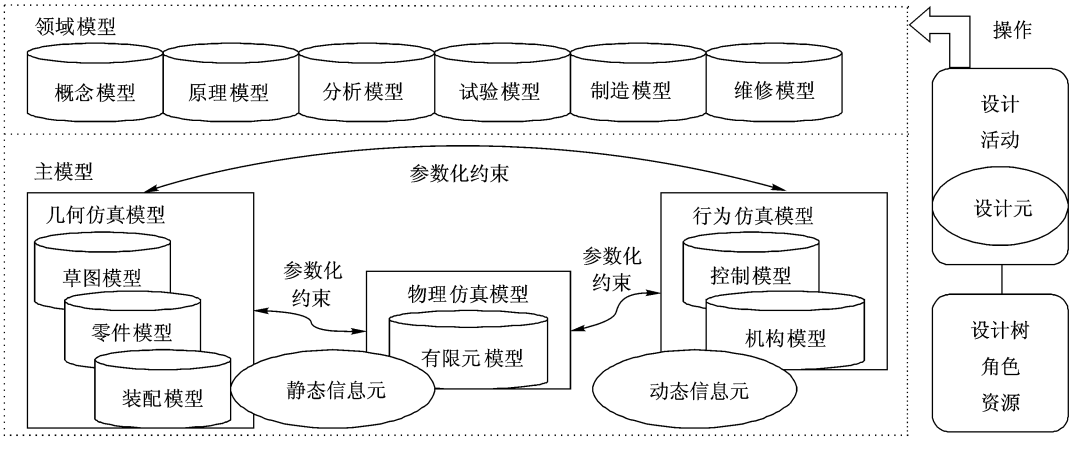

图1 支持数字样机的产品设计信息模型

所有仿真模型的信息耦合. 这种信息耦合使得仿真模型以多种形态嵌入到多形态样机系统，随着设计进程逐步完成从概念模型到产品模型的转化. 数字样机对象信息模型包括几何仿真信息模型、物理仿真信息模型和行为仿真信息模型等.

1) 几何仿真信息模型

几何仿真信息模型 M_{GEO} 是产品包括特征、零件、部件到整机所有层次几何模型的信息集合. 产品几何模型按照产品结构层次可以分为特征模型 M_{FEA}、零件模型 M_{PART} 和装配模型 M_{ASM}，且通过彼此约束形成继承关系. 定义 S_{CST} 为模型属性集和约束集的并，则 $M_{\mathrm{GEO}}:=\bigcup(M^i_{\mathrm{ASM}}\mid S^i_{\mathrm{CST}}):=\bigcup(M^j_{\mathrm{PART}}\mid S^j_{\mathrm{CST}}):=\bigcup(M^k_{\mathrm{FEA}}\mid S^k_{\mathrm{CST}})$，$i,j,k$ 为关联模型的个数，表示几何仿真信息模型是从各几何模型属性定义和约束关系中层层派生而来.

2) 物理仿真信息模型

几何模型可以赋以各种物理属性和约束，用特定分析方法转化为物理仿真模型. 物理仿真信息模型 M_{PSY} 是具有特定约束配置 S_{CST} 的几何模型 M_{GEO} 进行物理仿真分析 F_{PSY} 所包含的信息集合. 描述为 $M_{\mathrm{PSY}}=F_{\mathrm{PSY}}(F_{\mathrm{GEO}}(\bigcup M^{\mathrm{id}}_{\mathrm{GEO}}\mid S^{\mathrm{id}}_{\mathrm{CST}}))$，其中 id 为几何模型的索引号. 表示几何模型 $M^{\mathrm{id}}_{\mathrm{GEO}}$，在约束 $S^{\mathrm{id}}_{\mathrm{CST}}$ 控制下耦合为整体模型，经过模型简化操作 F_{GEO}，进行物理仿真分析.

3) 行为仿真信息模型

样机系统的行为模型是由系统输入输出及与环境的关系构成，是对产品功能原理的模拟与仿真. 行为仿真信息模型 M_{BHV} 是具有特定约束配置 S_{CST} 的几何模型 M_{GEO} 在仿真分析 F_{BHV} 控制下产生激励响应行为的信息集合. 描述为 $M_{\mathrm{BHV}}=F_{\mathrm{BHV}}(S_X, F_{\mathrm{GEO}}(\bigcup M^{\mathrm{id}}_{\mathrm{GEO}}\mid S^{\mathrm{id}}_{\mathrm{CST}}), S_Y)$. 行为仿真模型可以通过层层分解的单学科或局部交叉学科范围的分布式仿真模型耦合形成. 通过彼此端口关联，耦合成更大一级的行为仿真模型，最终获得系统样机的行为仿真.

数字样机对象信息模型 S_{DMU} 可以表示为包括产品在几何、物理和行为等方面仿真信息模型的并集，即 $S_{\mathrm{DMU}}=M_{\mathrm{GEO}}\cup M_{\mathrm{PSY}}\cup M_{\mathrm{BHV}}\cup M_{\mathrm{EXT}}$. 其中 M_{EXT} 是面向全生命周期的产品信息扩展模型的集合，包括工艺信息模型、制造信息模型、维修信息模型、质量信息模型和决策信息模型等.

2.3　设计过程控制信息模型

在数字样机设计环境下，设计过程是不同阶段、不同领域对仿真模型设计迭代的过程. 数字样机对象信息模型是各种设计约束控制和设计操作处理的结果. 所以设计过程控制模型 S_{DAC} 可以描述为数字样机对象信息模型 S_{DMU} 和施加的操作集 F_{DMU} 按照指定过程约束关系 φ 进行的信息集成，可描述为 $S_{\mathrm{DAC}}=\varphi(S_{\mathrm{DMU}},F_{\mathrm{DMU}})$.

为形式化描述设计过程控制模型，需要确定过程约束关系 φ 的内涵. 过程约束关系实际就是产品设计过程的控制策略. 通过定义产品设计树对象、设计角色对象和资源配置对象等基本控制单元，以实现对数字样机设计过程的控制.

1) 产品设计树对象

产品设计树对象是标识产品设计过程演变和产品组成结构的动态数据结构，是数字样机的组件约束对象. 描述为 $S_{\mathrm{DTR}}:=F_{\mathrm{DTR}}(S_{\mathrm{DMU}})$，表示其数据结构是数字样机对象模型按照功能方法树 F_{DTR} 展开派生而来. 产品设计树对象可以分别派生出反映产品设计过程的设计活动树，及反映样机零部件结构关系的产品结构配置树.

2) 设计角色对象

设计角色对象是设计过程中对仿真模型的操作权限约束. 每个设计角色可以操作多个仿真模型，同一仿真模型也可以由不同权限的设计角色操作访问. 设计成员 S_{MEM} 可以是个人 S_{PSN} 或组织机构 S_{ORG}，通过分配设计角色，实现指定权限的设计操作. 描述为 $(S_{\mathrm{ROL}}=F_{\mathrm{ROL}}(S_{\mathrm{DMU}}))\gg(S_{\mathrm{MEM}}:=S_{\mathrm{PSN}}\cup S_{\mathrm{ORG}})$，表示角色是数字样机对象操作权限的代理，与设计成员形成一对多映射.

3) 资源配置对象

资源配置对象是产品设计过程对人员、时间、资金及各种软硬件资源实现调度的基础数据结构，是设计过程中控制数字样机形成的约束对象. 描述为 $S_{\mathrm{CFG}}=F_{\mathrm{CFG}}(S_{\mathrm{DMU}}\mid\bigcup S^{\mathrm{id}}_{\mathrm{CST}})$，其中 id 映射不同资源类型，表示数字样机对象按照各种资源约束进行过程配置.

因此，设计过程控制信息模型 S_{DAC} 描述为：$S_{\mathrm{DAC}}=F_{\mathrm{DMU}}((S_{\mathrm{DMU}}:S_{\mathrm{DTR}}\mid S_{\mathrm{CFG}}),S_{\mathrm{ROL}}\gg S_{\mathrm{MEM}})$. 表明过程控制信息模型是以数字样机对象信息模型为基础，围绕产品设计树对象配置设计资源，设计成员分配设计角色，按照相关操作方法进行设计展开，实现多层次动态信息管理与控制. F_{DMU} 是基于产品设计元的操作方法集.

3　数字样机设计环境的构建

根据数字样机对象信息模型 S_{DMU} 和设计过程控制信息模型 S_{DAC}，建立支持数字样机设计的分布式协同仿真设计环境 DCSE(Distributed Collaborative Simulation Environment)，如图 2

所示.DCSE是一个基于分布式计算的协同仿真设计环境,所有设计者通过共享的数字样机对象信息模型对所承担样机组件开展设计活动.整个设计环境包含设计项目控制(Project)、知识库和实例库.每个客户端可以同时具有多个设计项目,也可以是其他客户端的子项目,所以整个数字样机是分布式环境下多个项目的展开集成的结果.

设计项目以产品设计树形式实现展开和集成,体现为具有信息耦合关系的数字样机结构视图和设计活动视图.结构视图以不同层次组件的树形结构反映数字样机构成关系,每个组件按照几何、物理和行为等关联所有仿真模型.设计活动视图则按照自顶向下的设计原则构成活动树,反映概念设计到详细设计等多个过程形态,每个过程按照对象属性方法,关联相应数字样机组件;从设计树对象派生设计流;通过角色分配操作权限;配置设计所需资源等.

DCSE将各种设计工具,如MATLAB,ADAMS,ANSYS和CATIA等,通过设计代理程序进行分布式集成.原型系统基于TCP/IP协议实现了具有C/S模式的分布式设计调度和仿真控制.设计者通过工作终端将仿真模型配置到计算服务环境,通过信息耦合形成数字样机仿真环境.在设计目标驱动下,实现数字样机的分布式协同仿真分析与验证.

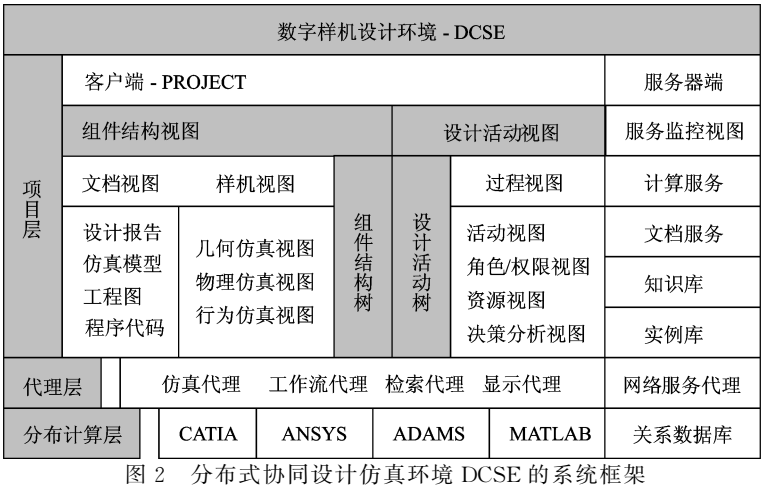

图2 分布式协同设计仿真环境DCSE的系统框架

4 结束语

数字样机对象信息模型是以产品静态特性和动态特性的信息融合为核心,贯穿产品全生命周期各个领域,是产品在几何、物理和行为等方面仿真模型的信息耦合.产品设计控制信息模型基于分布式协同设计要求,引入产品设计树对象、设计角色对象和资源配置对象等基本过程控制单元,通过合理配置设计资源,在角色/权限控制下,实现分布式设计协同,控制产品在全生命周期内各种仿真模型的处理.基于数字样机对象信息模型和设计过程控制信息模型,产品协同仿真设计环境反映了数字样机技术特点,可以实现对数字样机多层次、多形态的动态设计控制.

参考文献(References)

[1] Krause F L, Kaufmann U. Meta-modelling for interoperability in product design [J], CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2007, 56(1):159-162

[2] 严隽琪.虚拟制造的理论、技术基础与实践[M].上海:上海交通大学出版社,2003
Yan Junqi. Theory and practice of virtual manufacture [M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2003(in Chinese)

[3] Yang A. A multi-agent system to facilitate component-based process modeling and design [J]. Computers & Chemical Engineering, 2008, 32(10):2290-2305

[4] 林兰芬,高鹏,蔡铭.集成环境下产品建模技术的研究[J].浙江大学学报(工学版),2005, 39(8):1168-1173
Lin Lanfen, Gao Peng, Cai Ming. Integrated product modeling [J]. Journal of Zhejiang University, 2005, 39(8): 1168-1173(in Chinese)

[5] 熊光楞,王克明,郭斌.数字化设计与虚拟样机技术[J].CAD/CAM与制造业信息化,2004(Z1):33-34
Xiong Guangleng, Wang Keming, Guo Bin. Digital design and virtual prototyping [J]. CAD/CAM & Digital Manufacturing Industry, 2004(Z1):33-34(in Chinese)