

基于虚拟原型的概念设计描述模型 V-desModel*

杨强^{1,2}, 郭阳¹, 彭宇行¹, 李思昆¹

¹(国防科学技术大学 计算机学院,湖南 长沙 410073);

²(国防科学技术大学 管理科学与工程系,湖南 长沙 410073)

E-mail: qyang@nudt.edu.cn; qguo@nudt.edu.cn

http://www.nudt.edu.cn

摘要: 传统的概念设计方法由于缺乏真实感的交互手段,难以直观表达设计者的意图,基于虚拟原型的概念设计不仅能为设计者提供逼真的虚拟设计环境,而且充分体现了现代设计的成本低、周期短以及灵活性强等特点.针对概念设计的特点以及虚拟原型的特征分类,提出了基于虚拟原型的概念设计模型 V-desModel,其核心是利用产品视图模型描述设计对象,将虚拟特征概念融入视图模型中,并采用可扩展“三维实体-约束图”来描述设计对象之间的约束关系.V-desModel 模型能有效地支持基于虚拟原型的概念设计过程,较好地解决了概念设计中产品虚拟原型的逼真性要求和设计信息不完备之间的矛盾,不仅极大地扩展了概念设计实施的手段和范围,而且更有利于概念设计阶段创造性的发挥.

关键词: 计算机辅助设计;模型;概念设计;虚拟原型

中图法分类号: TP391 **文献标识码:** A

概念设计的建模一直是计算机辅助概念设计(CACD)系统的核心与关键技术^[1].传统的概念设计建模方法可归纳为基于功能的表示、域表示、设计语法、几何表示、面向对象技术以及基于知识的方法等^[2,3].这些方法依照传统的设计思路,在更高层次上对设计对象及设计活动进行抽象,强调 CACD 系统的功能,而在模型操作界面上一般采用文本或简单的图形方式,缺乏真实感强的交互手段.随着虚拟现实(VR)技术的日趋完善和在设计领域的广泛运用,基于产品虚拟原型(virtual prototype)的设计思想和方法^[4-7]得到越来越广泛的认同.虚拟原型是根据产品设计信息或概念描述产生的在功能、行为以及感官(视觉、听觉、触觉)特性方面与实际产品尽可能相似的可仿真数字模型.虚拟原型并不是简单的“三维 CAD+VR”模式,而是一个基于并行工程思想的先进设计理念和办法,强调产品描述模型在功能、行为与感官特性等方面与实际产品的一致性,并且能够支持多领域协同和上下游并行的“全视图”仿真,而“三维 CAD”仅是虚拟原型的一个局部视图.基于虚拟原型的概念设计是在概念设计阶段,根据用户对产品的要求和概念描述,生成产品的虚拟原型,在虚拟环境中对虚拟原型的结构、功能、性能等进行仿真,并根据产品评价体系提供的方法、规范和指标,为设计修改和优化提供指导和依据,使“设计-评价-修改”从多次串行工作模式下小的局部循环过程过渡到基于并行工作模式的整体大循环,实现对多个解决方案的比较和选择.然而,概念设计阶段的产品设计信息是不完备的,以此来建立真实感很强的产品虚拟原型十分困难.现有的系统^[5-7]一般基于传统的概念设计模型,将重点放在对虚拟原型的真实感显示和人机交互界面上(即传统的“三维 CAD+VR”模式).而虚拟原型的建立过程往往依赖于资深专家的丰富经验,缺少强有力的概念设计模型支持.因此,研究一种基于并行工程思想的产品描述模型,解决产品虚拟原型的逼真性

* 收稿日期: 2000-07-20; 修改日期: 2001-07-12

基金项目: 国家 863 高科技发展计划基金资助项目(863-511-42-01)

作者简介: 杨强(1972-),男,河南信阳人,博士,讲师,主要研究领域为并行设计,虚拟原型技术,信息与决策;郭阳(1971-),男,浙江东阳人,博士,助理研究员,主要研究领域为电子 CAD,并行设计;彭宇行(1963-),男,湖南长沙人,博士,副研究员,主要研究领域为电子 CAD,并行与分布处理;李思昆(1941-),男,教授,山东青岛人,主要研究领域为电子 CAD,并行设计,虚拟现实.

要求和概念设计阶段设计信息不完备之间的矛盾,是当前虚拟原型技术研究中亟待解决的关键问题之一。

本文在分析虚拟原型的特征分类以及概念设计过程特点的基础上,提出一种基于虚拟原型的概念设计描述模型 V-desModel,其核心特点是采用产品视图模型描述设计对象,将虚拟特征概念融入视图模型中,并采用可扩展“三维实体-约束图”描述设计对象之间的约束关系。V-desModel 不仅能有效地支持基于虚拟原型的协同与并行设计过程,而且较好地解决了概念设计中产品虚拟原型的逼真性要求与设计信息不完备之间的矛盾。

1 特征分类与视图模型

基于虚拟原型的机电产品概念设计需要综合考虑机械设计信息(如几何、布局、材料、工艺等)、电子设计信息(如行为、结构、物理等)和各种约束因素(如工程规范、生产工艺、成本、可维修性等)对产品性能的影响。我们将产品的几何、布局和行为等设计信息统称为视图,分别用不同的视图模型来描述,如几何视图模型、结构视图模型等。每一个视图模型由该视图的构件原语构成,我们称该构件原语为视图特征。

定义 1. 视图特征集 $F^{(p)} = \{f_i^{(p)} | i=1,2,\dots,n_f^{(p)}\}$ 中的特征 $f_i^{(p)}$ 由设计特征 $df_i^{(p)}$ 、表象特征 $pf_i^{(p)}$ 和虚拟特征 $vf_i^{(p)}$ 构成:

$$f_i^{(p)} = \{df_i^{(p)}, pf_i^{(p)}, vf_i^{(p)}\}, i=1,2,\dots,n_f^{(p)},$$

其中 $p \in P$ 为产品视图, $n_f^{(p)}$ 为与视图 p 对应的视图特征个数。设计特征集 DF 、虚拟特征集 VF 和表象特征集 PF 为

$$DF = \bigcup_{p \in P} \{df_i^{(p)} | i=1,2,\dots,n_{df}^{(p)}\},$$

$$VF = \bigcup_{p \in P} \{vf_i^{(p)}(df_{ij}^{(p)}) | i=1,2,\dots,n_{vf}^{(p)}; j=1,2,\dots,n_f^{(p)}\},$$

$$PF = \bigcup_{p \in P} \{pf_i^{(p)}(df_{im}^{(p)}, vf_{in}^{(p)}) | i=1,2,\dots,n_{pf}^{(p)}; m=1,2,\dots,n_{df}^{(p)}; n=1,2,\dots,n_{vf}^{(p)}\}.$$

定义 2. 特征属性集 $A^{(p)}$ 是视图特征 $f_i^{(p)}$ 量的描述,即属性 $a_{ij}^{(p)}$ 的集合,其定义为

$$A^{(p)} = \bigcup_{p \in P} A_i^{(p)} = \bigcup_{p \in P} \{a_j^{(p)}(f_i^{(p)}) | j \in \{1,2,\dots,n_{A_i}^{(p)}\}\} \quad i=1,2,\dots,n_{A_i}^{(p)}.$$

表象特征直接服务于产品的验证(模拟与仿真)过程,其本身并不独立存在,而是对设计特征与虚拟特征的抽象,是用户以视觉、听觉以及触觉的方式对虚拟原型的感受。此时,计算机仅负责对虚拟原型进行表现,一般借助于 VR 设备。设计特征服务于产品的设计过程,设计师利用传统的 CACD 系统或先进的 VR 设备进行创造性设计,计算机忠实地记录设计的过程和结果,构成虚拟原型的设计特征。设计特征能为表象特征与虚拟特征提供原始的设计数据。虚拟特征是根据表象特征的需求,以设计特征为基础进行的扩充,计算机负责必要的解释、补充、验证以及规划等推理性的智能工作。

定义 3. 特征表达类操作,如果 f 定义为

$$f : (df_1, \dots, df_m, vf_1, \dots, vf_n) \rightarrow pf, df_i \in DF (i=1, \dots, m), vf_j \in VF (j=1, \dots, n), pf \in PF,$$

则称 f 为特征表达类操作,简称特征表达,记为 O_p 。特征表达类操作包括表象特征请求、表象特征产生、动态重构及特征删除等。

定义 4. 特征生成类操作,如果 f 定义为

$$f : (df_1, \dots, df_k) \rightarrow vf, df_i \in DF (i=1, \dots, k), vf \in VF,$$

则称 f 为特征生成类操作,简称虚拟特征生成或特征生成,记为 O_G 。特征生成类操作包括设计特征解释、设计特征补充、虚拟特征验证、虚拟特征规划等。

通用的特征表达和特征生成类操作构成操作类库,虚拟原型通过类的引用来调用这些操作,而模型特有的操作内嵌在各模型里直接使用。

定义 5. 视图主体模型 $M^{(p)}$ 是其视图特征集 $F^{(p)}$ 、属性集 $A^{(p)}$ 、质关系 $R_F^{(p)}$ 和量关系 $R_A^{(p)}$ 的集合,即

$$M^{(p)} = \{F^{(p)}, A^{(p)}, R_F^{(p)}, R_A^{(p)}\}.$$

由于概念设计阶段需要综合考虑各下游设计阶段中的因素对产品性能的影响,每个视图均可分成不同的

阶段,如电子设备设计包括概念设计阶段、逻辑设计阶段及物理设计阶段等.因此,不同的阶段,视图主体模型的具体表现也不同.

定义 6. 视图实体模型 $E^{(P)}$ 是视图主体模型 $M^{(P)}$ 的实例,即视图主体模型在不同设计阶段的具体表现.

$$E^{(P)} = M_I^{(P)} = \{F_I^{(P)}, A_I^{(P)}, R_{FI}^{(P)}, R_{AI}^{(P)}\}, \text{下标 } I \text{ 表示实例.}$$

视图实体在 V-desModel 模型中分成 3 类:实视图实体、灰视图实体和虚视图实体,分别表示已经完成的设计、部分完成的设计和尚未开始的设计.视图主体模型与视图实体模型统称为视图模型 V.

定义 7. 一个产品的虚拟原型 VP 是其所有视图模型 V、视图模型之间质关系 R_F 、量关系 R_A 以及操作 O_P, O_G, O_R 构成的集合:

$$VP = \{V, R_F, R_A, O_P, O_G, O_R\},$$

其中 O_R 是约束操作,其定义见第 2 节.

虚拟原型是对概念设计中产品对象的抽象描述,在概念上它强调的是所设计产品的总体性,由若干个视图主体模型以及它们之间的相互关系与操作组成.视图主体模型可以理解为有关产品对象具有相应视图局部功能的设计单元,是设计单元在各视图的相关特征集合.而视图实体模型是有关主体的局部化相关特征集合,与特定设计阶段有关,具有局部的独立性.由于视图特征的描述比较复杂(如形状特征),并且描述的粒度也不同(如虚拟特征),因此,一般采取分层的方式对其进行表示,以适应不同的应用需求.

基于以上定义,一个产品的虚拟原型可层次式地描述为<虚拟原型-视图主体模型-视图实体模型-特征-分类特征-属性集>结构(如图 1 所示).该结构的特点与优势主要体现在:(1) 由相对独立又相互联系的视图主体模型构成的虚拟原型,既可保证各设计领域和设计视图的独立性,又能使模型在很大程度上具有与真实产品近似的几何、结构、行为、功能等描述,能有效地支持各设计领域的协同设计过程,充分考虑各设计领域的因素对产品性能的影响;

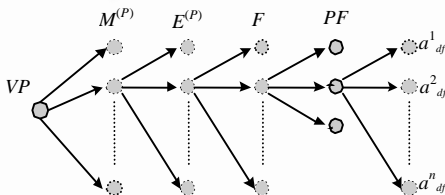


Fig.1 Hierarchical structure of virtual prototype
图 1 虚拟原型层次结构描述

(2) 各视图主体模型按设计阶段分成视图实体模型,符合产品阶段性设计过程,能充分考虑下游各设计阶段的因素对产品性能的影响,避免设计反复带来的设计周期变长,增加设计成本等不利因素;(3) 将虚拟原型的特征分为表象特征、设计特征和虚拟特征,符合虚拟原型逼真性与虚拟性的要求,使模型能有效地支持基于虚拟原型的设计、仿真、测试、评价等过程;(4) 虚拟特征与特征生成类操作的引入是虚拟原型的关键,使得在概念设计阶段

即建立功能、行为以及感官特性方面与实际产品尽可能相似的可仿真数字模型成为可能.

2 可扩展“三维实体-约束图”

在 V-desModel 模型中,为了充分考虑上下游并行设计与视图间协同设计的相互制约因素,与产品视图模型相对应,我们提出了可扩展“三维实体-约束图” $G=(V,E)$ 来描述视图实体之间质与量的依赖关系,其中顶点集 V 是视图实体的集合,边集 E 定义了视图实体之间的约束关系.

定义 8. 根据视图实体的定义,一个顶点 V_i 的描述模型为

$$V_i = \{F, A, R_F^I, R_A^I, R_F^O, R_A^O\}$$

其中 F (视图实体的特征集)、 A (视图特征属性集)、 R_F^I (视图实体内部特征关系)和 R_A^I (视图实体内部属性关系)为顶点的内部描述; R_F^O (视图实体间的特征关系)和 R_A^O (视图实体间的属性关系)为顶点与外界的接口.

定义 9. 边 $e=(v_1, v_2)$ 定义了顶点,即视图实体之间存在的约束关系.边包含了两种类型的约束:特征间质的关系和属性间量的关系.

V-desModel 模型中的约束分为显式约束和隐含约束两种,分别以实边和虚边表示.显式约束是指已经确定的在固定视图实体之间的约束,隐含约束表示在设计时为了达到某种设计指标,而形成的动态的无法固定在特定视图实体之间的约束,如生产工艺、成本及可维修性等均可以隐含约束的形式出现.

“三维实体-约束图”以图 $G=(V,E)$ 表示,如图 2 所示.产品的设计过程细分为若干(如图 2 中的 3 个)阶段,各阶段的视图实体分别用 $v_i^1, v_i^2, v_i^3 (i \in \{1,2,3,4,5\})$ 表示. XY 平面上的边集 $\{e=(v_{i1}^{j1}, v_{i2}^{j2}) | j_1=j_2\}$ 定义了同一阶段视图实体之间的约束关系; Z 方向相连的视图实体构成一个视图主体 $v_i=v_i^1 v_i^2 v_i^3 (i \in \{2,3,4,5\})$, Z 方向的边集 $\{e=(v_{i1}^{j1}, v_{i2}^{j2}) | i=i_2\}$ 定义视图主体内的视图实体之间的约束关系.其中 v_1 是复合视图主体,它由两个元视图主体组成; $v_i (i \in \{2,3,4,5\})$ 是元视图主体.

定义 10. 约束操作 $O_R=\{VE, VA, EG, EA, ED, CP, O\}$ 是约束图 G 中与 V, E 相关的操作集合,其中 O 是图 G 中 V, E 添加与删除等常规操作.

定义 11. 顶点展开 VE(vertex expansion)操作 $f: v_j \rightarrow (v_1, v_2, \dots, v_i)$ 是随着产品概念设计过程的不断深入,将一个视图实体划分成若干个视图实体,即将 G 中的一个顶点 v_j 展开成若干顶点 (v_1, v_2, \dots, v_i) 的过程.

基于虚拟原型的概念设计融合了 Top-Down 和 Bottom-Up 两种设计方法.VE 主要是伴随 Top-Down 设计中设计实体不断分解过程的约束操作,可分为边共享展开、边分享展开和边独享展开 3 种,如图 3 所示.边共享展开是指顶点 v_0 展开成 v_1 和 v_2 后,顶点 v_0 上的边 e_1, e_2 同时变成 v_1 和 v_2 的边(如图 3(a)所示);边分享展开是指顶点 v_0 展开成 v_1 和 v_2 后,顶点 v_0 上的边 e_1, e_2 分别变成 v_1 和 v_2 的边(如图 3(b)所示);边独享展开是指顶点 v_0 展开成 v_1 和 v_2 后,顶点 v_0 上的边 e_1, e_2 全部变成 v_1 的边(如图 3(c)所示).而 VA 则是伴随 Bottom-Up 设计中设计实体不断抽象成更高层次实体过程的约束操作.

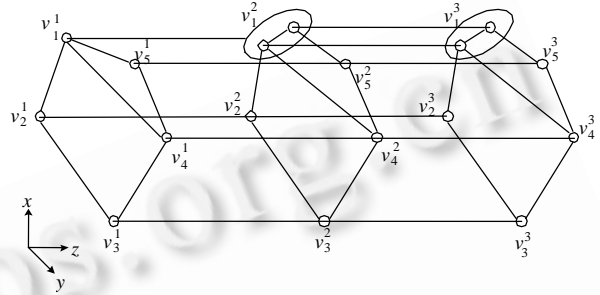


Fig.2 3D entity-constraint graph
图 2 三维实体-约束图

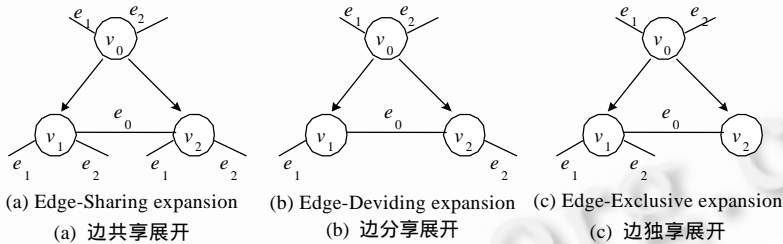


Fig.3 Vertex expansion
图 3 顶点展开

定义 12. 顶点聚合 VA(vertex aggregation)操作 $f: (v_1, v_2, \dots, v_i) \rightarrow v_j$ 是 VE 的逆过程,即在产品概念设计过程中,将若干个视图实体合并成一个视图实体,即将 G 中的若干顶点 (v_1, v_2, \dots, v_i) 合并成一个顶点 v_j 的过程.与 3 种 VE 对应的逆过程分别称为同边聚合、异边聚合和消边聚合,如图 4 所示.

定义 13. 边生成 EG(edge generation)操作 $f: 0 \rightarrow v$ 是伴随 VE 过程或新视图实体及约束加入过程而生成新约束关系的过程,如图 3 中边 e_0 的产生就是一个 EG 过程.

定义 14. 边聚合 EA(edge aggregation)操作 $f: (e_i, e_j) \rightarrow e_k$ 是 VA 过程中相同类型的边合并成一条边的过程.如图 4(a)中 v_1 和 v_2 上的边 e_1, e_2 合并成 v_0 的边 e_1, e_2 .

定义 15. 边删除 ED(edge deletion)操作 $f: e_i \rightarrow 0$ 是伴随 VA 过程而删除边,并将 R_F^0, R_A^0 转换成 R_F^i, R_A^i 的过程,如图 4 中边 e_0 的删除.

V-desModel 模型中允许不同类型的边进行聚合,但它不是一个独立的过程,可分解成 EG 和 ED 子过程.如不同类型的边聚合 $f: (e_i, e_j) \rightarrow e_k (e_i, e_j)$ 可分解成子过程:

$$f_1: 0 \rightarrow e_k; f_2: e_i \rightarrow 0; f_3: e_j \rightarrow 0.$$

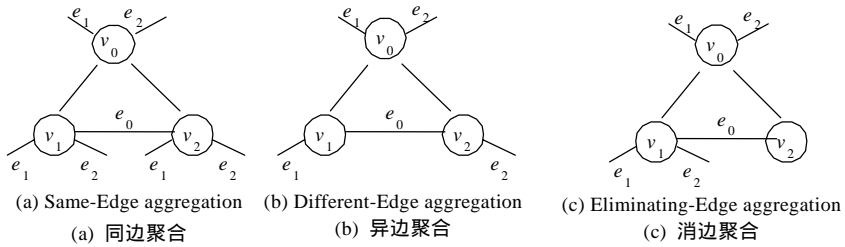


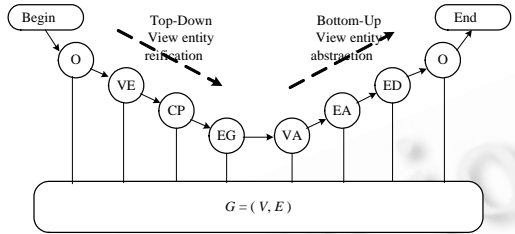
Fig.4 Vertex aggregation

图4 顶点聚合

定义 16. 如果边 $e_i(e_i \in E)$ 为一条表示隐含约束的虚边, $\{e_j|e_j \in E\}$ 为一组表示显式约束的实边, 则约束规划

CP(constraint programming)操作 $f:e_i \rightarrow \{e_j\}$ 是将隐含约束映射到具体视图实体之间约束的过程.

在基于虚拟原型的概念设计过程中, 为了充分考虑下游各设计阶段设计因素对产品性能的影响, 首先采用 Top-Down 方法将虚拟原型逐步分解成各主要视图实体, 并通过约束规划操作将约束映射到具体视图实体间的依赖关系, 完成视图实体之间的约束分析之后, 再采用 Bottom-Up 方法逐步将视图实体抽象成更高层次的视图实体, 并将下游的设计约束依次传递到



开始, 视图实体细化过程, 视图实体抽象过程, 结束.

Fig.5 Process of constraint operation
图5 伴随概念设计的约束操作过程

上游. 相关过程中的约束操作如图 5 所示.

3 应用与结论

为了描述 V-desModel 模型, 我们开发了一种基于虚拟原型的概念设计产品模型描述语言——虚拟原型建模语言 VPML(virtual prototype modeling language)^[8], 并在 V-desModel 模型和 VPML 语言基础上, 实现了一个协作虚拟原型环境——CVPE^[9]. 系统主要功能是在概念设计阶段根据产品功能和性能描述以及设计师提供的设计方案生成电子设备的虚拟原型, 设计者和产品用户可以从不同角度、不同需求出发, 对虚拟原型进行测试、仿真与评价(如图 6 所示). 基于 CVPE, 我们成功地完成了多个机电产品的概念设计^[9], 包括机械手及其控制系统、巨型机主机系统以及手持式电子地图系统等.

例如, 手持式卫星定位电子地图系统的概念设计由卫星接收天线、手持机三维几何造型、电子信号处理器、地图显示屏以及操作按键等设计组成. 概念层虚拟原型对象包括几何实体、行为功能和使用环境, 涉及到机械、通信及电子

(包括硬件和软件)等多个领域(视图主体)的协同设计与仿真, 并且各领域又可细分为不同的设计阶段(视图实体). 不同领域和不同阶段分别由不同的 CAD 或 EDA 工具与模型提供支持, 是一个具有多领域协同和上下游并行特点的并行设计过程. 系统采用“视图模型”和“可扩展三维实体-约束图”将产品各领域和阶段的设计有机地结合在一起, 并引入虚拟特征生成机制弥补概念设计阶段不完备的信息, 通过机电一体化的联合仿真, 为设计者

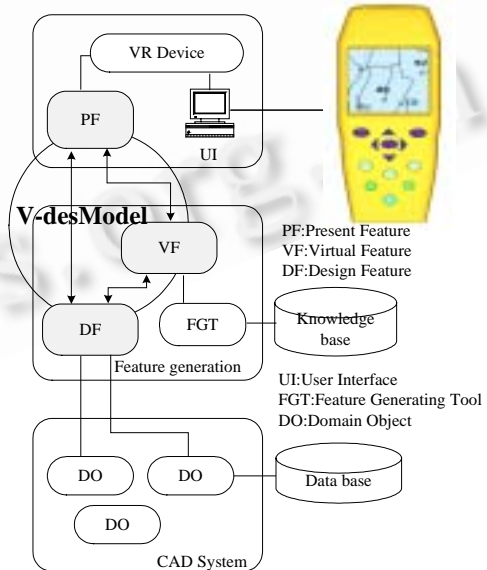


Fig.6 Collaborative virtual prototyping environment

图6 协作虚拟原型环境

和用户提供具有与实际产品尽可能相似的虚拟原型,以便在系统提供的虚拟环境中进行逼真测试与仿真。

通过这些实例应用,表明 V-desModel 和 CVPE 是可行而且有效的。

References:

- [1] Bao, En-wei, Sun, Shou-qian, Pan, Yun-he. The development of computer-aided conceptual design. In: Pan, Yun-he, ed. Proceedings of the Computer-Aided Industry Design and Conceptual Design'98. Hangzhou: 1998. 103~109 (in Chinese).
- [2] Sullivan, B.A. Constraint-Aided conceptual design [Ph.D. Thesis]. National University of Ireland, 1999.
- [3] Xue, D., Yadav, S., Norrie, D.H. Knowledge base and database representation for intelligent concurrent design. Computer-Aided Design, 1999,(31):131~145.
- [4] Li, Si-kun, Guo, Yang, Yang, Qiang. Concurrent design methodology of digital system based on virtual prototype. Journal of Software, 1998,9:89~92 (in Chinese).
- [5] Pratt, M.J. Virtual prototypes and product models in mechanical engineering. In: Proceedings of the IFIP WG 5.10 Workshop on Virtual Prototyping. 1994. 113~128.
- [6] Srivastava, M.B., Richards, B.C., Broderson, R.W. System level hardware module generation. IEEE Transactions on VLSI System, 1995,3(1):20~35.
- [7] Haas, S., Jasnoch, U. Cooperate working on virtual prototypes. In: Proceedings of the IFIP WG 5.10 Workshop on Virtual Prototyping. 1994. 48~57.
- [8] Yang, Qiang, Li, Si-kun, Guo, Yang, et al. VPML——virtual prototype modeling language. Journal of Computer Research and Development, 2001,38(7):882~887 (in Chinese).
- [9] Guo, Yang. Research and implementation of concurrent design environment based on virtual prototype [Ph.D. Thesis]. Changsha: Institute of Computer Technology, National University of Defence Technology, 1999 (in Chinese).

附中文参考文献:

- [1] 包恩伟,孙守迁,潘云鹤.计算机辅助概念设计研究新进展.见:潘云鹤编.'98 全国计算机辅助工业设计与概念设计学术会议论文集.浙江,1998.103~109.
- [4] 李思昆,郭阳,杨强.基于虚拟原型的数字系统并行设计方法研究.软件学报,1998,9:89~92.
- [8] 杨强,李思昆,郭阳,等.虚拟原型建模语言 VPML.计算机研究与发展,2001,38(7):882~887.
- [9] 郭阳.基于虚拟原型的并行设计环境研究与实现[博士学位论文].长沙:国防科学技术大学计算机学院,1999.

V-desModel: Description Model Based on Virtual Prototype in Conceptual Design*

YANG Qiang^{1,2}, GUO Yang¹, PENG Yu-xing¹, LI Si-kun¹

¹(Institute of Computer Technology, National University of Defence Technology, Changsha 410073, China);

²(Department of Management Science and Engineering, National University of Defence Technology, Changsha 410073, China)

E-mail: qyang@nudt.edu.cn; yguo@nudt.edu.cn

<http://www.nudt.edu.cn>

Abstract: Traditional conceptual design methods cannot express designers' intent directly because of the lacking of 3D interface mechanisms. Conceptual design based on virtual prototype can not only provide a 3D virtual design environment, but also meet the needs of low costs, short cycle and flexibility of modern design. Considering the characteristics of conceptual design and the feature classification of virtual prototype, a novel virtual prototype-based product model V-desModel in conceptual design is presented in this paper. It introduces virtual feature concept in product's view models, and employs expandable 3D entity-constraint graph to describe the constraints between design objects. V-desModel can effectively support the process of cooperative design and concurrent design. By employing the concept of virtual feature and method of virtual feature generation, V-desModel can solve the insufficient information problems in constructing virtual prototype during the conceptual design of product. It can not only expand the means and ranges of conceptual design, but also be beneficial for the exertion of creativity during conceptual design.

Key words: CAD; model; conceptual design; virtual prototype

* Received July 20, 2000; accepted July 12, 2001

Supported by the National High Technology Development 863 Program of China under Grant No.863-511-42-01