

基于约束的分布式产品特征设计系统

黄双喜* 范玉顺

(清华大学自动化系 CIMS 中心 北京 100084)

Tel: 010-62789634-1056 Email: huangsx@cims.tsinghua.edu.cn

摘要 面向分布式产品设计活动的管理与控制, 基于特征和约束技术, 该文提出了一个分布式产品设计系统, 对系统的结构、方法和应用实例进行了说明。它采用特征和约束来建立产品模型, 并通过特征算法来控制 and 协调分布式的产品设计活动。

关键词 分布式产品设计 特征设计 约束

分类号 TP391.72

1. 前言

网络化敏捷制造需要企业采用一种基于多功能团队的分布式协同模式进行产品的设计开发。这种模式实现的关键在于对不同工作小组之间设计活动的有效控制、管理和协调。尤其是在分布式设计环境下, 产品的设计过程受分布在异地的多种因素共同约束和影响, 若没有一个合适的方法对设计活动进行管理和控制, 整个设计将是盲目的、低效的。

在本文中, 我们提出一种基于约束的分布式产品特征设计方法。它采用特征作为基本的设计体素, 将产品设计活动看作是一个需求和约束满足的过程, 通过特征算法来控制产品需求和约束的求解过程。这里, 我们用需求来表示产品的功能和产品设计应满足的设计规范, 而用约束来表示产品特征在一定环境下合乎存在的条件, 包括几何或非几何信息。产品需求和约束都是促进产品设计活动和引导寻求设计解空间的。需求着眼于设计产品本身的属性, 而约束则与产品设计实现过程的外部条件、特征间的相互关系相关。在分布式设计环境下, 产品需求和约束都可能来自于不同位置。需求和约束满足的过程在实际产品设计中表现为产品特征集合与产品需求和约束集合之间的对应过程。不同的特征或特征集合对应于不同的产品需求和约束。随着特征的不断加入, 产品设计不断完善, 相应的产品需求和约束被不断的满足, 直至需求和约束集合为空。需要指出的是: 基于特征的产品设计过程并不仅仅是将特征进行简单的叠加, 而是在一定的设计方法即特征算法的控制下, 满足产品全约束条件的一系列有序操作的集合。本文将对基于约束的产品特征设计方法以及基于该方法的一个分布式产品特征设计系统进行详细的分析和描述。

2. 基于约束的分布式产品特征设计

* 清华大学博士后

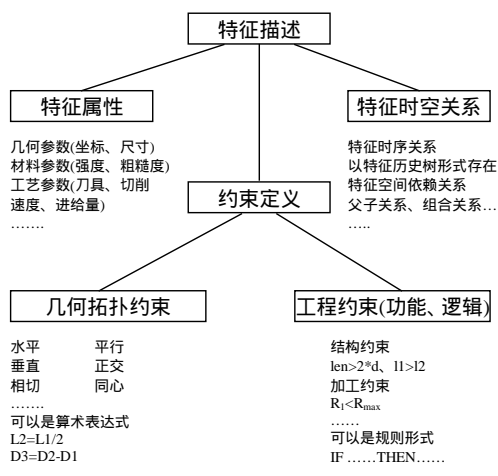


图 1 特征层次描述模型



图 2 一个零件的设计特征模型

在特征设计系统中，特征是产品模型的基本组成元素^{[1],[2]}。但一个完整的产品模型不仅包含基本的特征属性信息和时空关系信息，它还包含有复杂的约束信息，如几何拓扑约束、工程约束等^{[3],[4]}。图 1 描述了一个层次化特征模型的结构。按照该层次模型，对于一个由五个基本特征（基体特征、角拉伸、通孔特征、阶梯和盲槽）组成的零件（图 2），其部分的特征和约束关系可表示为图 3。

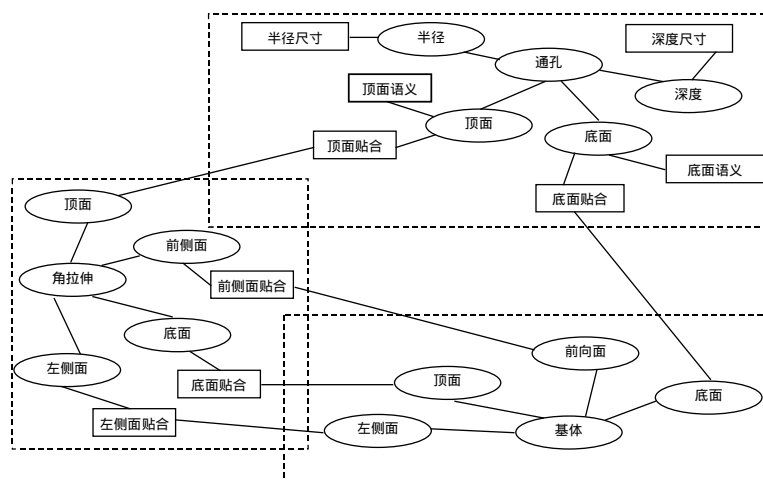


图 3 基体、通孔和角拉伸特征所组成的约束图

在图 3 中，方形代表约束，椭圆形代表特征的参数变量，弧代表变量与约束之间的关系。这只是一个简单零件的部分约束图，对于一个复杂零件，其生命周期中的所有约束将组成一个极其复杂的约束图。因此，在实际产品设计过程中，特别是在分布式协同设计环境下，如何使设计活动能够满足产品各方面的约束要求^[5]，如何保证产品设计活动的收敛性，如何使整个设计活动按照有序可控的方式进行，一直都是产品设计领域的研究重点。基于特征和约束技术，我们开发了一个分布式产品设计系统来满足上面这些问题，其系统结构如图 4

所示。

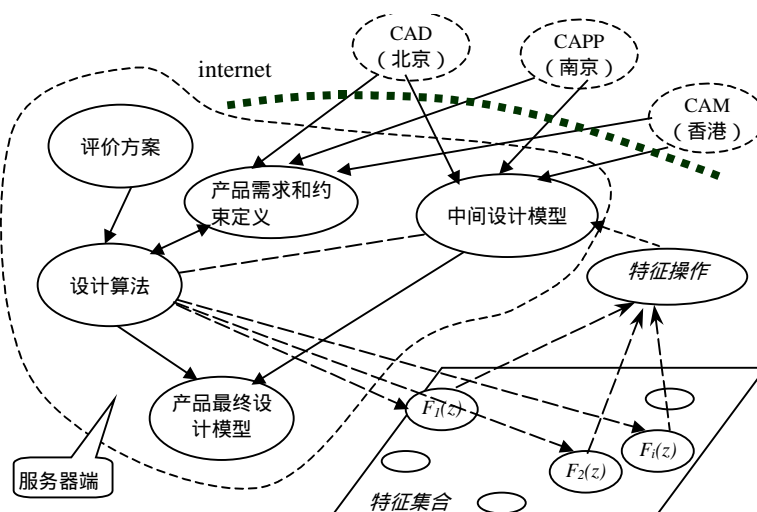


图 4 基于特征算法的分布式产品设计系统

该系统将产品设计看作是一个需求和约束的满足和求解过程，其解为最终产品模型，而解元则为符合产品需求和约束要求的特征。设计人员可以在分布式环境下通过网络建立产品的需求和约束模型，并定义设计初始需求和约束集合。在系统中，我们提供了多样化的产品需求和约束定义方式，用户可以采用等式、不等式、规则和谓词等形式进行需求和约束的定义，也可以从不同的层次，如产品层、部件层、零件层、特征层来逐步细化和完善产品的需求和约束模型（图 5）。



图 5 产品需求建模

以图 2 所示零件为例，我们可以在特征层次为通孔特征定义如下四个约束：通孔顶面位于方形凸台顶面、底面位于基体底面、直径大于 0.5、相对与基体坐标系通孔圆点 X 坐标是 Y 坐标的两倍。形式化通孔的约束定义，其约束集合可以表示为 $C_{Throughhole} = \{C_1, C_2, C_3, C_4\}$ ，其中：

$$C_i: \text{Bottom} = \text{Block.Bottom}$$

$$C_2: \text{Top} = \text{ConerProtrution.Top}$$

$$C_3: \text{Diameter} > 0.5$$

$$C_4: X = 2Y$$

一旦建立了产品初始需求和约束模型,设计人员就可以根据该模型进行产品的设计求解。在特征设计系统中,设计求解实际上是通过特征运算,既通过特征的交并差操作来完成的。一次特征运算可以消解掉产品的一个或多个需求和约束,形成一个产品中间模型。经多次迭代后,就可获得满足所有需求和约束要求的产品最终模型。然而,这些特征运算并不是随意进行的,它必须在一定的算法控制和协调下有序的进行。特别是在分布式设计环境下,有多人同时参与产品的设计活动,必须采取正确有效的控制方法来管理和协调分布式的设计活动,保证设计活动的有效性和收敛性。

在我们的系统中,我们定义了一个统一的产品模型,放置在一个中央服务器中。分布式设计人员可以通过网络对服务器中的产品模型进行访问和存取,获取产品的需求和约束信息,对产品模型进行进一步的设计。服务器中将设置统一的存储机制来控制产品模型的访问和修改。同时,服务器中还将建立一个设计引擎,通过特征算法来管理和协调分布式产品设计活动。特征算法定义了产品特征模型的求解步骤和方法,保证分布式产品设计以清晰、合理、有序和可控的方式进行。下面将对系统所采用的特征算法进行详细描述。

3. 基于特征算法的分布式产品设计

在阐述特征算法之前,定义如下相关符号^[6]:

$\{\}$:	集合	$\langle \rangle$:	有序集合
A :	设计算法	$\{C_i(z)\}$:	设计约束集, z 代表约束的位置
d_i :	领域规则	ij :	特征 F_i 与 F_j 之间的关系
P_i :	设计初始模型	$\{ij\}$:	特征 F_i 间关系的集合
$\langle f_i \rangle$:	自需求到特征的一个有序映射集	F_i :	设计特征
F_{null} :	空设计特征	$\langle F_i \rangle_p$:	特征模型 P 的有序特征集
P :	基于特征的设计模型	P_{new} :	特征运算后的特征模型
P_{null} :	空模型	$\{R_i\}$:	功能需求集
$\{R_i\}_s$:	满意功能需求集	$\{R_i\}_u$:	非满意功能需求集
W_i :	特征有效约束	:	特征算子

基于特征的算法分四步将设计需求和约束逐步地转变为产品特征模型,每一步又包含

了多个子步骤^[7]。

➤ 步骤 1(抽取)

抽取原始设计规范和设计要求成为相应功能需求集 $\{R_i\}$ 和约束集 $\{C_i\}$,其中每一功能需求 R_i 和设计约束 C_i 将能对应于某一特征集。这一步骤相当于原始设计或者概念设计初期。

➤ 步骤 2(设计初始化)

$$\{R_i\}_{i=1} = \{R_i\}, \{C_i\}_{i=1} = \{C_i\}$$

$$\{R_i\}_{s=1} = \text{空}, \{C_i\}_{s=1} = \text{空}$$

$$P = P_i$$

开始非满意需求约束集 $\{R_i\}_u$ 、 $\{C_i\}_u$ 等于当前抽取需求约束集 $\{R_i\}$ 、 $\{C_i\}$,而满意需求约束集 $\{R_i\}_s$ 、 $\{C_i\}_s$ 等于空集,当前产品模型 P 为初始模型 P_i ,完成设计初始化后,随着设计的展开, $\{R_i\}_u$ 、 $\{C_i\}_u$ 中的需求和约束逐步得到满足转而进入 $\{R_i\}_s$ 、 $\{C_i\}_s$,如此循环直到 $\{R_i\}_u$ 、 $\{C_i\}_u$ 为空集。

➤ 步骤 3(设计需求和约束到形状转换)

在这一步中,设计需求和约束映射为特征集合,其中每一特征将通过特征操作运算加入特征模型。在映射过程中,将首先考虑产品的功能需求集合,针对产品功能需求选取合适的特征集合与之匹配,然后根据产品的具体设计约束如形状约束、空间约束等来确定特征的具体参数,实现设计约束到形状的转换。其具体步骤如下:

● 选择映射

3—1: 若 $\{R_i\}_u$ 为空,转步骤 4;否则,从 $\{R_i\}_u$ 中选一 R_i 。

3—2: 从设计特征分类中找出一与所选的功能需求 R_i 匹配的 f_i 映射集,这里的匹配指能将需求映射为一系列相关设计特征,运用评价机制在 f_i 映射集中将 f_i 分级,满足高级列于前,记为 $\langle f_i \rangle$ 。

3—3: 自 $\langle f_i \rangle$ 中选择最前的 f_i ,若 $\langle f_i \rangle$ 为空则设计不可行需重新定义需求或重新选择 f_i 。

在这一步中主要找出与功能需求相应的映射 f_i ,为下面的特征运算作准备,但由于需求定义或选择映射 f_i 不够准等原因,有可能造成设计不能进行下去,需变换功能需求或映射 f_i 。

● 特征分解

功能需求所映射的特征可能为一简单的单元特征,也可能是简单单元特征的复合,在我们的算法中对特征的操作运算基于单元特征,在目前大多数参数化实体造型系统中特征操

作运算就其实质是基于单元特征类实例化的特征运算,虽然有时可直接将一个复合的特征引入,但此复合特征亦是由单元特征经若干特征操作运算得到的。

3—4:若功能需求映射为一个或若干个复合特征,将此复合特征分解成一功能需求集插入 $\{R_i\}_d$ 中,转3—1,否则转步骤3—5。

- 约束求解

3—5:选取产品的约束集合中与当前功能需求相关的约束变量,并对其进行求解,确定特征的具体形状参数和空间位置参数。

- 模型转变

3—6:选择适当的特征操作运算符,将所选特征通过操作运算施加于特征模型 P ,产生新的模型 P_{new} 。由于新特征 F_i 的加入,可能给原来特征模型 P 带来一些影响,产生了新模型 P_{new} 的需求和约束有效性检验问题。前者将在3—7讨论,后者在3—8中阐述。

- 约束有效性检验

3—7:对约束集 $\{C_i\}$ 所组成的约束网络进行检验,若有约束冲突产生,则撤消3—6,从 $\langle f_i \rangle$ 中删去当前 f_i ,重新3—3。这在实际造型系统中亦有类似的反映,表现为零件(特征)不能生成,主要是由于增加新特征给原有模型带来了影响,原来模型满足的有效水平可能产生变化,或者产生了新的约束不满足等情况,使新特征 P_{new} 不能生成,在草图及信息窗口中以高亮图形和文字信息来表示。

- 功能有效性检验

3—8:经过3—6,检查在 $\{R_i\}_s$ 中每个 R_i 对新模型 P_{new} 是否仍满足,若不,则从 $\{R_i\}_s$ 中去除,转而进入 $\{R_i\}_u$ 中。

- 更新需求约束集

3—9:去除 $\{R_i\}_u$ 、 $\{C_i\}_u$ 中已满足 P_{new} 的 R_i 、 C_i ,插入到 $\{R_i\}_s$ 、 $\{C_i\}_s$ 中,继续3—1

- 步骤4(设计完成)

经过多次迭代,最后生成产品最终设计模型,完成产品整个设计活动。

图6显示了基于特征算法的整个设计流程。下面我们将以图2所示零件为例,对一个实际的基于特征算法的分布式产品设计过程进行分析。

首先,我们根据产品的功能和设计要求抽取产品的需求和约束并形成产品的初始需求和约束集合,这对应于特征算法的步骤1和步骤2。对于图2所示零件,我们可以定义如下的初始需求集合 R 和约束集合 C :

$R = \{\text{方形毛胚、顶面方形凸台、右侧方形阶梯、顶面盲槽、顶面通孔}\}$

$C = \{C_1, C_2\}$ | C_1 : 产品长<20cm; C_2 : 产品高<15cm

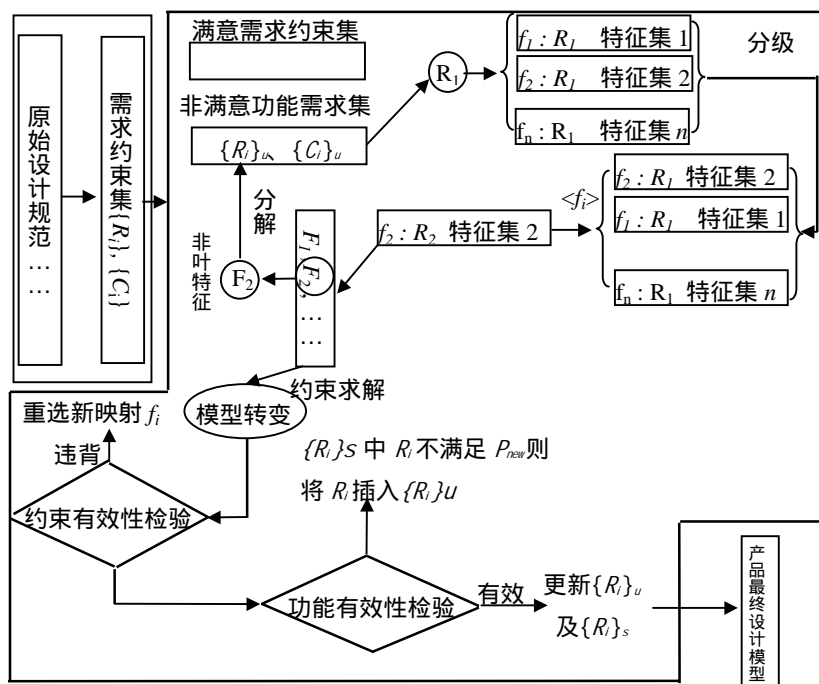


图 6 基于特征算法的设计流程

初始需求集合 R 和约束集合 C 将被定义在产品统一模型中，并放置在中央服务器上。设计人员可以通过网络从服务器中获得产品的需求和约束信息。服务器将对产品统一模型设置存储和管理权限，一旦模型被检出，则不允许其他设计人员再对其进行修改。在步骤 1 和 2 完成后，步骤 3 将是一个由多人参加的循环迭代的过程，首先设计人员检出产品初始模型到本地，并首先考虑排名较前的产品需求，如考虑方形毛胚的设计，设计人员可以采用一个方形特征来与需求相对应，完成产品功能需求与设计特征的对应（步骤 3-4）。在本例中，虽然我们可以确定用方形特征与方形毛胚相对应，但我们无法确定该方形特征的具体形状和位置。因此，我们必须补充定义一些约束来确定该方形特征的形状和位置。当然，我们也可以添加其它的工程约束和功能需求定义。这种动态的需求和约束定义使设计活动可以根据设计要求的动态变化而动态改变，大大增强了设计的柔性和适应性。一旦特征参数被完全确定，就可以通过特征运算加入到产品初始模型中，形成一个中间模型。然后，系统将对产品约束集合 C 中的约束进行检查，对该模型的有效性进行判定，如果模型有效，则将所求解的需求和约束从集合中去掉，并将所生成的新的产品模型和需求约束集合检入到服务器中，形成一个产品中间模型。这时，其他设计人员就可以对该中间模型进行查看，并可以检出该模型，重复步骤三，生成新的产品中间模型。如此循环，直至产品需求和约束集合为空就得到最终的产品设计模型，完成产品的整个设计活动。

4. 结论

分布式产品设计是网络化协作环境下所必需的设计方式,只有使用分布式设计,才能在有限的时间和资源约束下开发出用户最满意的产品。基于特征和约束理论,我们在 Solidwork 平台上采用 VB6.0 开发了一个分布式协同产品设计原型系统^[8]。该系统可以为分布式网络环境下不同应用领域的设计人员提供基础的设计工具、设计环境和相应的管理协调工具,可以有效地支持分布在异地的设计小组协同进行产品设计。

参考文献

- [1] Case K, Gao J. Feature technology: an overview[J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 1993,6(1): 2-12.
- [2] W.F. Bronsvort and F.W. Jansen, Feature modelling and conversion: Key concepts to concurrent engineering[J], Computers in Industry, 1993,21: 61-86.
- [3] Anderl, Mendgen R. Modelling With Constraints: Theoretical Foundation and Application[J]. Computer-Aided Design,1996,28(3): 168-176.
- [4] Dohmen, M.. A survey of constraint satisfaction techniques for geometric modeling[J]. Computers & Graphics, 1995,19(6), 831-845.
- [5] He JianLian, Chang TianQing. Constraint based scheduling for the concurrent engineering product development process[J]. Chinese Journal of Computers, 1998,21(10): 906-913.(in Chinese)
- [何健康, 常天庆. 基于约束的并行工程产品开发过程规划[J]. 计算机学报, 1998,21(10): 906-913.]
- [6] Wen-Yau Liang, Peter O. Object-Oriented Formalism for Feature-Based Distributed Concurrent Engineering(R). Technical Report, American: University of Iowa, TR98-03: 7-11.
- [7] Huang Shuangxi, Fan Yushun. Object-oriented Approach for Distributed Product Design System Construction[J]. Mechanical Science and Technology, 2001,20(1): 156-158.(in Chinese)
- [黄双喜, 范玉顺. 基于对象的分布式产品设计系统构建. 机械科学与技术. 2001,20(1): 156-158.]
- [8] Huang Shuangxi. Research on Methods and Theories In Computer Supported Distributed Product Design(D). Ph D Dissertation, Nanjing: School of Manufacturing, Nanjing Univ. of Sci. & Tec.1999.(in Chinese)
- [黄双喜. 计算机支持的分布式产品设计方法与理论研究(D). 南京:南京理工大学制造学院, 1999.]

Feature and Constraint based Distributed Product Design

Huang Shuangxi Fan Xushun

(Department of Automation, Tsinghua University, Beijing, 100084)

Abstract Orienting the control and management of distributed product design activities, this paper proposed a feature and constraint based distributed product design system. The method and structure of the system is presented and a use case of the system is discussed. It models the product using features and constraints and controls the distributed product design activities through a feature algorithm.

Keywords distributed product design, feature design, constraint

作者简介：

黄双喜：1972年8月出生。籍贯四川省射洪市。1993年7月本科毕业于南京理工大学机械学院。96年4月硕士毕业于南京理工大学制造学院。99年10月博士毕业于南京理工大学制造学院，获工学博士学位。99年11月至今在清华大学自动化系国家CIMS工程技术研究中心作为博士后研究人员。主要研究方向为计算机支持的协同工作、网络化敏捷制造、协同商务和企业建模。对企业建模、 workflow 管理、协同电子商务、CSCW等方面的国内外研究现状以及关键技术都有清晰的认识。在国内外期刊会议上发表论文十余篇。