

支持广义优化设计的产品模型结构研究*

邱清盈** 冯培恩 武建伟 潘双夏

浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室, 机械设计研究所, 杭州 310027

摘要 针对广义优化设计的特征,提出了以网状和树状层次结构为核心的广义优化产品模型框架. 提出节点复用技术,从而统一了树状和网状层次结构模型,使经扩展的层次树结构能适用于系列化和组合化产品建模. 探讨了产品的分解准则,定义了7种用于构建通用产品模型的树节点,并详细研究了每种节点的建模特性. 将研制成功的产品建模系统应用于液压挖掘机的广义优化产品建模实践中,得到了成功验证.

关键词 产品模型 优化建模 广义优化 设计理论

迄今,人们根据不同的应用目的,从不同的研究角度,提出了多种不同的产品模型,如:产品二维、三维几何模型,支持 CAD/CAPP 集成的产品特征模型^[1],和正在完善中的用于支持产品寿命周期数据交换的基于 STEP 标准的产品模型^[2]等. 这些模型的区别在于它们对产品的描述具有不同的侧重性、完整性和复杂性,适合于不同的应用要求.

在优化设计发展到广义优化设计^[3]时,优化模型如果仍然采用传统的由设计目标、设计约束和设计变量三要素组成的模型结构,将难以满足广义优化设计的面向产品全系统、全性能和全过程优化的建模要求. 为此,本文提出了一种新的普适的支持广义优化设计的产品模型结构.

1 广义优化设计特征及其对产品模型的要求

广义优化设计的特征主要体现在优化对象、优化范围和优化准则的广义化^[4,5]:

(1) 现代机械产品的系统性、综合性和规模化导致设计模型向横向扩展. 传统优化往往只适用于简单零部件,广义优化则把对象扩展到复杂零部件、整机、系列产品和组合产品的整体优化,由单学科领域的优化发展到机、液、光、电、信息的集成优化. 统称为全系统优化.

(2) 客户要求的多样化导致基于全性能的多目标优化. 传统优化往往只侧重于某种或某一方面性能的优化,处理不同类性能时一般分先后顺序. 广义优化把优化准则则由仅考虑某方面性能扩展到技术性、经济性和社会性的综合评估和优化. 统称为全性能优化.

(3) 对产品寿命周期优化的市场需求导致设计模型的纵向扩展. 传统优化往往局限于

2001-02-21 收稿,2001-04-05 收修改稿

* 国家自然科学基金重点项目资助(批准号: 59635150)

** E-mail: qyqiu@yahoo.com

产品技术设计阶段的优化,广义优化把优化的范围扩展到面向设计、制造、经销、使用和用后处理的产品寿命周期设计过程。统称为全过程优化。

上述特征决定了用于广义优化设计的产品模型应是既综合考虑产品自零部件到整机直至系列和组合的产品全系统模型,也应综合考虑产品技术性、经济性和社会性的全性能模型,还应是综合考虑从设计、制造、使用到使用后处理的全过程模型。

实践证明,直接建立这样一个只有一个层次的三全整体设计模型非常困难,即使可能建成,但当需要增加、修改或删除整体模型中的某一因素,都会产生难以确认的影响。因此,需要特别强调:采取一定的策略对产品进行分解建模的目的,首先是为了便于设计师建模,其次才是如目前大多数人所认为的,便于对大规模复杂问题进行串行或并行的协同求解。

2 产品模型的基本结构框架

基于上述认识,本文提出了广义优化产品模型基本结构框架如图 1 所示:在纵向层次上,由系列、整机、部件、零件、特征等节点构成网状层次结构,给出全系统模型的框架(图 1(a))。在每个节点内部建立相应的全性能和全过程树状层次结构模型,并通过全系统模型框架集成为一体。图 1(b)为一个示例,对不同节点这一结构会有增删。而且图中所示每一种性能的含义都是广义的,对不同产品的不同节点,可以有不同的具体意义。例如力性能对液压挖掘机的工作装置部件可细分为最远位置挖掘力、最深位置挖掘力等,若对象为齿轮箱,可以指传递的扭矩等。

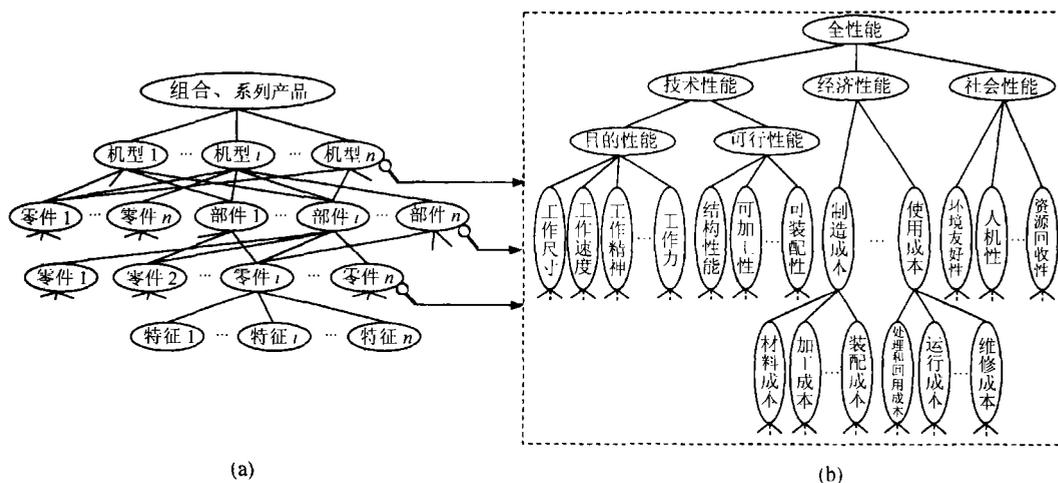


图 1 广义优化产品模型结构示例

(a)产品全系统层次结构(局部);(b)各节点上面向寿命周期的全性能层次结构(局部)

3 模型组织和表达中的两个关键技术问题

3.1 产品网状模型向树状模型的统一

考虑到网状数据结构在计算机中表达和处理较困难,而且当网状结构较复杂时也不利于

设计师快捷有效地建模,因此,针对图 1(a)产品层次网的特点:节点之间只有纵向交叉,不存在横向交叉,提出了“节点复用”技术:即通过重复使用一些节点,使产品层次网中的每个节点都只有惟一的一个父节点,从而打破原节点之间的纵向交叉,将产品层次网转化为产品层次树,实现了两者的统一,如图 2 所示。

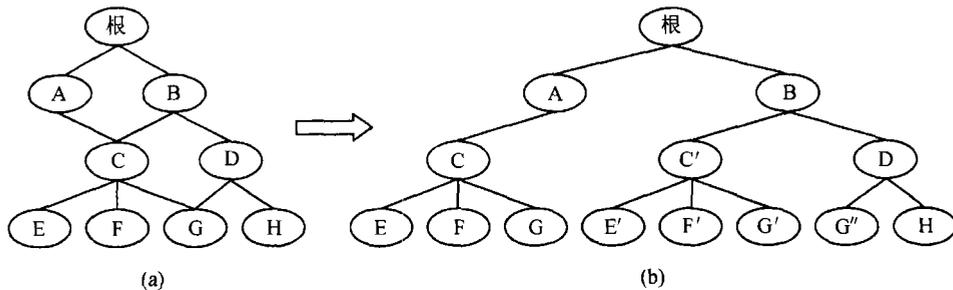


图 2 采用节点复用技术将层次网转化成层次树

(a) 层次网; (b) 转化后的层次树

所谓“重复使用”并不是简单地对原节点的完全复制,也不是建立虚拟链,而是创建一种新类型的节点,称为副本节点,如图 2(b)中的节点 C' 、 E' 、 F' 、 G' 和 G'' ,通过复制原节点的最基本标识信息(在第 4 节中介绍)与原节点建立对应关系。

复用时需要遵循的准则是:如果一个被复用节点不是叶节点,那么它的下属各层节点都需要复用。例如,在将如图 2(a)所示的层次网转化为如图 2(b)所示的层次树时,节点 C 的下属节点 EFG 都需要随 C 一齐复用。

采用节点复用技术的优点在于:

- (1) 真正做到了产品网状结构向树状结构的转化,而且这种转化是惟一的。
- (2) 继承了节点间原有的层次性,同时不失真地保留了每个节点的下层结构。如图 2 所示,转化后节点间的层次性保持不变:图 2(a)中节点 C 拥有 EFG 3 个节点,在图 2(b)中节点 C 同样拥有 EFG 3 个节点。
- (3) 副本节点与原节点的建模特性完全相同,对设计师来说,它们看上去个个都是原节点,包含的信息完全相同。

节点复用技术的缺点是原节点的多父性经过转化后变得不直观。不过这一缺点可通过采用不同颜色和复原到原产品网等手段加以弥补。

3.2 产品的分解准则和最小覆盖子树标准

对产品按层次结构表达时,另一个需要思考的问题是如何合理分解?即分解准则问题。如果随意分解,不仅会造成节点之间的关联关系表达混乱,而且会严重影响协同优化求解的效率和效果。

目前一般有面向装配和面向功能两种分解标准。面向装配的标准按照装配过程的预装配组进行分解,体现了“零件加工——分装——总装”的实际生产过程,能够很好地反映零部件之间的装配关系。面向功能的标准按照产品的功能结构进行分解,能够较好地反映分解后每个部件的功能。除了对一个完全模块化的产品,按照上述两种分解标准可得到完全一致的结果

外,应该说依据这两种标准进行分解各有优缺点:按面向装配的标准可能难以在某些层次上表达其他性能;按面向功能的标准恰恰相反,对某些部件的装配性能可能反映不全面。

考虑到广义优化设计的全过程和全性能优化要求,从方案设计到技术设计按功能分解可以更自然地表达出各零部件的全性能. 因此,在实际建模时,建议设计师优先采用面向功能的分解标准. 当遇到某个零件或部件与多个其他零部件共同承担某项或某几项功能,而且与它发生功能关系的这些零部件分属于不同的子树下时,建议首先考虑能否在不影响模型精度的前提下,忽略一些次要的功能关系,然后将它归属到能够最小覆盖那些与它有关系的零部件所在子树的根节点下,此即最小覆盖子树标准。

例如对于图 3(a)所示的已进行了部分分解的产品树,考虑与部件 C, F, H 都有功能关系的部件 X 的归属问题. 如果部件 X 与 F 承担主功能,它与 C 和 H 的功能关系可以忽略,则可将 X 归属于部件 D 下,如图 3(b)所示;如果部件 X 与 F 和 H 一起承担了主功能,与 C 的功能关系可以忽略,则应将 X 归属于部件 B 下,如图 3(c)所示;如果与 C 一起承担了主功能或者所有功能关系都不能忽略,则必须将 X 归属于部件 A 下,如图 3(d)所示。

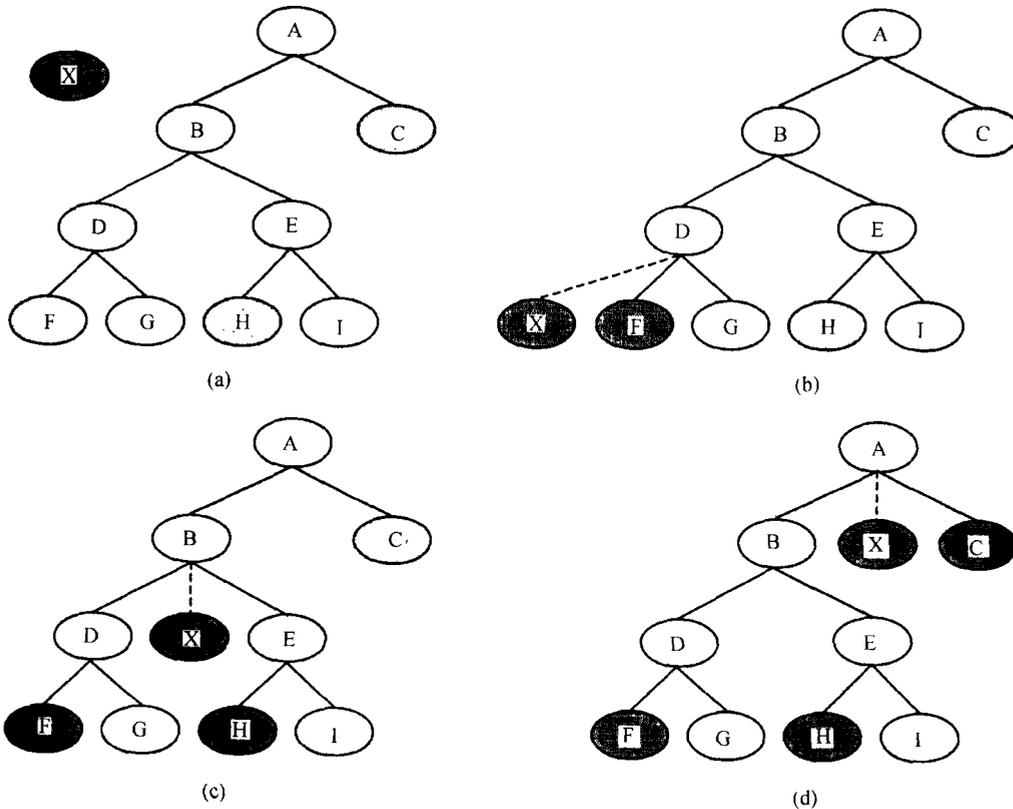


图 3 产品分解的最小覆盖子树标准

(a) 已部分分解的产品树(局部); (b) 部件 X 与 C, H 的功能关系可忽略; (c) 部件 X 与 C 的功能关系可忽略;

(d) 部件 X 与 C, F, H 的关系均不可忽略

4 模型构建节点的建模特性探讨

根据上述讨论,为了满足广义优化产品建模的需要,定义了 7 种用于构建通用产品模型的树节点:系列节点、整机节点、部件节点、零件节点、特征节点、配套件节点和副本节点,其中前 4 种为基本节点,对应于产品中需要自行设计的那部分模块,后 3 种为辅助节点. 下面分别探讨它们的建模特性,以便设计师在实际应用时能够合理选用.

4.1 系列节点

系列产品可分为纵向系列产品、横向系列产品和扩展型系列产品¹⁾. 它们的主要区别在于:纵向系列中各产品的主参数不同,横向系列中各产品的主参数相同,而扩展型系列产品指既有纵向系列又有横向系列的产品. 例如,16,25,40 t 等不同质量等级的挖掘机形成了一族纵向系列产品,而对于同样 40 t 的挖掘机采用不同尺寸的工作装置(长、短动臂,长、短斗杆,宽、窄铲斗等)形成一族横向系列产品.

纵向系列产品设计的关键在于制定合理的系列型谱,横向系列产品设计的关键在于确定功能谱(所要覆盖的功能范围)以及实现功能谱的执行部件种类,而对于扩展型系列产品,一般首先需要制定系列谱,在此基础上再设计出功能谱和实现功能谱的整机数量. 因此,对于只有纵向系列或者只有横向系列的产品,其分解后的产品树一般可表达为一个系列节点,下面接几个整机节点,如图 4(a)所示;而对于扩展型系列产品,其分解后的产品树需要表达为:一个系列节点,代表纵向系列产品,下面接几个整机节点和几个系列节点,这时系列节点对上相当于一个整机节点,对下代表某个主参数下的横向系列产品,它下面可再接几个整机节点,如图 4(b)所示.

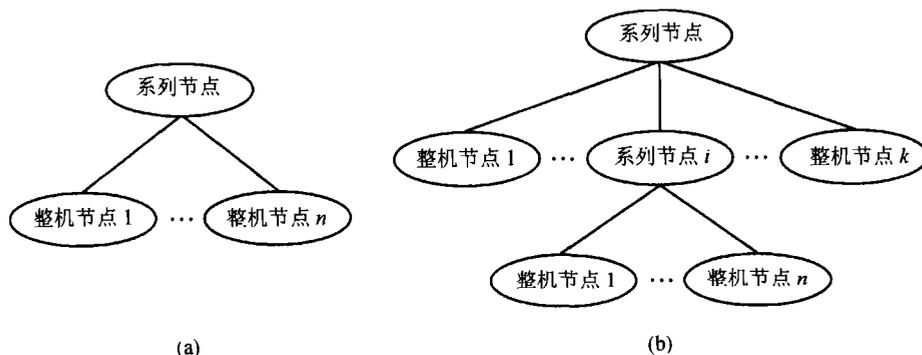


图 4 系列产品树的构造

(a) 纵向系列或横向系列产品树; (b) 扩展型系列产品树

4.2 整机节点

整机由各种零部件(包括标准件、外购件、共用模块)组成. 因此整机节点下面可以接部件节点、零件节点、副本节点和配套件节点.

1) 潘双夏. 组合化系列产品设计方法学的研究. 浙江大学博士学位论文, 1992

对于系列产品,整机的主参数在上层系列节点的设计模型中确定,并作为继承参数传到整机节点.对于非系列产品,整机的主参数一般根据市场需求或者客户的要求由设计师确定.整机设计模型的内容主要是在整机主参数确定后,求解它的下属各零部件的关键设计参数(包括相互间的装配参数),对于配套件来说是选型参数,以及对各零部件的性能要求(功能分配问题).

例如,对于液压挖掘机来说,在主参数整机重量确定后,需要设计出包括斗容、液压泵的功率、底盘尺寸等关键设计参数,以及工作装置、回转支撑装置、行走装置、液压系统等零部件间装配参数,求得挖掘范围、挖掘力、稳定性、工作效率、成本等综合设计指标最优的方案.得到的设计结果,像液压泵功率、底盘尺寸等参数值将分别传递到液压系统和行走装置作为它们的已知设计条件;设计出的挖掘范围、挖掘力大小将传递到工作装置部件作为它的已知设计要求;等等.

4.3 部件节点

在组合产品中,一个共用模块可能是部件,也可能是零件,因此不再额外定义一个模块节点进行表示,而视模块的实际情况用部件节点或零件节点来描述.

与整机节点类似,部件节点下面可以接另一个部件节点、零件节点、副本节点和配套件节点.部件的主参数在整机节点或者上层部件节点中确定,它的设计模型的功能也与整机的设计模型类似,用来确定下属的各子部件和零件的关键设计参数和性能要求.

4.4 零件节点

零件作为产品的基本功能单位,在 CAD 阶段本来已经不必再分,但为了使广义优化设计结果能够无缝地提供给后续的 CAPP 系统,采用特征对零件信息进行描述.

零件的主要设计参数在上层的部件节点中确定,在零件层,除了少数独立承担功能的零件可能需要进行功能设计再确定一些参数外,主要是根据已设计出的参数进行施工设计,包括工艺结构及其参数设计(如倒角、退刀槽、越程槽等)、表面粗糙度设计及形位公差设计等.

4.5 特征节点

特征作为零件某方面设计信息的一种表达,内部没有任何模型,只定义了一些描述参数,其中有些可以直接继承零件节点的相关参数,有些需要作简单的转换,如长度到角度的转换.

特征是产品模型的最小构成单位,因此特征节点下面不能再接任何节点.

4.6 配套件节点

配套件指那些不是由产品开发厂家自行设计和制造的部件或零件,而是产品需要选用的一种标准件或者外购件.但如果将配套件概念广义化,则那些已被厂家模块化的不再需要设计的零部件也可列入其中,从而有利于提高模块化程度高的厂家的产品建模效率.

配套件选择得合适与否对产品性能会产生较大的影响.常规设计时,设计师一般凭经验从配套件样本中尝试性地选择,这不但费时而且不一定能选用到最合适的.因此,在广义优化设计中,专门把配套件定义为一种节点类型,通过在其内部定义选型模型进行优选.选型模型主要由备选配套件库、选型参数和各种选择标准组成,根据选型参数和选型要求从备选配套件库中选出一个最适合的配套件.选出配套件后,配套件的外部尺寸、安装尺寸或性能指标将提供给其他零部件,作为它们的设计依据.

由于配套件对当前产品来说不用再设计,因此配套件节点下面也不再接任何节点.

4.7 副本节点

副本节点是为了满足组合化产品建模的需要,将产品网转化为产品树而引入的一种节点类型。在它的内部只包含原节点的最基本信息,例如原节点的名称、父节点等信息,而不必包含原节点的设计信息。

副本节点的建模特性完全等同于其复用的原节点。

综上,归纳 7 种构建节点的建模特征如表 1 所示。

表 1 7 种产品构建节点的建模特性

名称	扮演的角色	承担的功能	包含的设计信息	可能的下属节点
系列节点	系列产品	确定系列谱或功能谱	系列层设计模型	系列和整机节点
整机节点	整机	确定下属零部件的主参数和性能要求	整机层设计模型	部件、零件、副本、和配套件节点
部件节点	部件或模块	同整机	部件层设计模型	同整机
零件节点	零件或模块	确定与工艺有关的尺寸参数	零件层设计模型	特征节点
特征节点	特征	描述零件的某方面工程信息	描述参数	无
配套件节点	标准件或外购件	提供配套件的结构尺寸和性能	选型模型	无
副本节点	复用的部件、零件或配套件节点	支持组合产品的设计,将产品网转化为产品树	节点名、父节点等原节点的基本信息	与其原节点相同

5 结论

本文提出的创造性研究工作主要可归结为:

(1) 针对广义优化设计特征,提出了以网状和树状层次结构为核心的广义优化产品模型的框架,满足了面向产品全系统、全性能和全过程的广义优化建模需要。

(2) 提出节点复用技术,巧妙地把产品网统一到产品树结构中进行组织和表达,使经扩展的层次树结构能适用于系列化和组合化产品建模。

(3) 在产品的分解、产品树的构建和层次划分、以及 7 种模型构建节点的定义等方面融入和赋予了新的内涵。特别是配套件节点的引入,体现了模块化、标准化和通用化的产品设计原则。

作者已根据所提出的广义优化产品模型结构,开发了相应的产品建模系统。利用该系统,建立了某型号的液压挖掘机横向系列广义优化产品模型,并在后续优化规划^[4]和优化求解等模块的支持下实践了广义优化设计,取得了成功。

参 考 文 献

- 1 Li H L, et al. Feature-based parametric product modeling system in CIMS environment. *High Technology Letters*, 1997, 3(1): 13
- 2 ISO TC184/SC4. ISO 10303—Standard for the exchange of product model data(STEP). URL: <http://www.nist.gov.sc> 4
- 3 冯培恩,等. 面向工程的广义优化设计. 见:国家自然科学基金委员会编. 机械工程科学技术前沿. 北京:机械工业出版社,1996. 162~174
- 4 冯培恩,等. 机械产品的广义优化设计进程研究. *中国科学, E 辑*, 1999, 29(4): 338
- 5 冯培恩,等. 机械广义优化设计的理论框架. *中国机械工程*, 2000, 11(1-2): 126, 176