

doi: 10.11918/j.issn.0367-6234.2015.03.007

产品结构与或树的设计成本优化控制模型

胡仕成¹, 徐永东²

(1. 哈尔滨工业大学(威海) 经济管理学院, 264209 山东 威海;

2. 哈尔滨工业大学(威海) 计算机科学与技术学院, 264209 山东 威海)

摘要: 针对大型离散制造企业产品结构特点, 提出产品的自制件、外购件、原材料和工艺的多级综合结构模型. 为了实现产品设计成本的优化控制, 建立产品结构与或树的配置模型, 并通过定义产品组成子件之间的相关性表示产品满足工艺需求的可制造性. 基于单级产品结构与或树给出产品设计成本优化模型, 采用仿真示例进行验证. 仿真结果表明, 所提出的 DFC 的模型 Opt-BOMP 较之 DTC 模型能够获得成本更优的产品设计方案. Opt-BOMP 充分考虑了用户对产品的质量需求、供应商对外购物料的影响、产品的工艺要求、产品设计和生产的结合, 能够增强产品设计的可行性.

关键词: 产品综合结构模型; 产品结构与或树; 设计成本控制; 优化模型

中图分类号: F272; TB21

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2015)03-0042-07

Product and/or tree structure based on design cost optimization and control model

HU Shicheng¹, XU Yongdong²

(1. School of Economics and Management, Harbin Institute of Technology at Weihai, 264209 Weihai, Shandong, China;

2. School of Computer Science and Technology, Harbin Institute of Technology at Weihai, 264209 Weihai, Shandong, China)

Abstract: With respect to the characteristics of product structure in large discrete manufacturing enterprise, a multiple level product structure which integrated self-made items, outsourcing parts, raw materials and making processes was proposed. Afterwards, aiming at the optimization and control for product design cost, a product and/or tree structure based on configuration model was established, in which the assembly feasibility satisfying the requirements of an item making process was represented by the definition of correlation between its components. Based on the single level product and/or tree structure, a design cost optimization model was then given. Simulation experiments were employed to demonstrate its effectiveness. The experiments showed that the proposed Opt-BOMP on model DFC can achieve a better cost product design than the DTC model. The Opt-BOMP has considered the quality requirements of a product, the impact of supplier on outsourcing materials, the technology requirements of a product and the combination of product design and manufacturing, it can improve the feasibility of a product design.

Keywords: integrated product structure; product and/or tree structure; design cost control; optimization model

产品设计包括产品零件表 (bill of material, BOM) 的设计和生产工艺路线 (bill of process, BOP) 的设计. 设计成本包括材料成本 (cost of BOM, CBOM) 和工艺/加工成本 (cost of BOP, CBOP). 设计成本的控制是对产品成本的源流进

行的控制, 产品实际成本的 70% 左右是在设计阶段确定的, 而设计阶段发生的费用只占产品成本的 6% 左右^[1]. 因此, 在设计阶段进行成本控制比在后续阶段更加有效. 文献[2]设计一种基于计算机辅助设计 (computer aided design, CAD) 的单层结构产品设计成本的控制系统, 该系统在对产品的特征采用智能知识表示的基础上建立了产品的特征和加工成本之间的关系, 从而支持在产品的概念设计过程中对加工路线和材料的选择. 文献[3]建立产品的质量和成本与产品的加工参数之

收稿日期: 2013-12-20.

基金项目: 国家自然科学基金(61172099); 山东省自然科学基金(ZR2012FM006); 威海市科技发展计划资助(IMZQWH010016).

作者简介: 胡仕成(1970—), 男, 副教授, 硕士生导师.

通信作者: 徐永东, ydxu@insun.hit.edu.cn.

间的关系,从而可对产品的质量和成本进行灵敏度分析,实现对产品的加工成本的最小化.文献[4-5]提出一种软件产品的质量优化模型,该模型实现了软件产品的控制目标,文献[4]同时还考虑了软件的子模块之间的相容性问题.文献[6-7]提出产品设计优化配置的一种线性规划模型,该模型支持对构成产品子件的多个可选件进行优化选择,选择准则可以是成本,也可以是质量.文献[8-9]提出一种产品的成本设计模型,该模型建立在质量功能配置(quality function deployment, QFD)的质量屋关系矩阵的基础之上.文献[10]采用 QFD 和层次分析过程(analytical hierarchy process, AHP)相结合的产品设计方案的分析方法,利用 QFD 确定产品的设计参数和准则,在利用 AHP 对设计参数和准则进行量化的基础上得到产品各种设计方案的评价值,从而可选择出成本最低、客户满意度最大的产品设计方案.文献[11-12]则采用成本/收益比来比较评价产品的多个设计方案.文献[13-14]建立了产品的特征参数和成本之间的关系,支持在产品过程中对产品成本的在线及时估算,确保所设计的产品成本最优.文献[15-16]在影响产品加工成本的因素进行详细分析的基础上建立了产品成本的估算模型,从而支持通过交互式来实现质量性能条件下的产品成本的最小化.文献[17]建立了产品的功能模型,然后采用多维准则(包括质量和成本等)对产品的多个设计方案进行评价.文献[18]提出产品成本的一种基于产品成本属性的估算方法,从而支持各个节点产品的优化配置.文献[19]建立面向大批量定制的产品成本估算模型.文献[20]提出基于组合模糊神经网络的方法进行建设工程成本估算.文献[21]建立在非平稳需求下的库存控制模型,并采用遗传算法求解.文献[22]等将控制论的观点引入成本控制中,对成本实施动态控制.

以上各种设计成本控制系统都有不同的特点和不同的适用对象.文献[2, 13, 14, 18]建立产品的特征和成本之间的关系,但由于缺乏有效的模型作指导,其产品成本优化过程主要依赖手工配置.文献[3, 15, 16]主要关注产品加工成本的优化.文献[4-5]是针对软件产品的质量和成本控制.文献[20, 22]是针对建设工程项目成本的估算.文献[21]是针对库存成本的控制.文献[6, 7, 19]只能适用于单级产品结构的优化.文献[8, 9, 10, 17]采用分析的方法实现成本的优化,因此其成本控制效果完全取决于专家的比较判别能力.文献[11-12]追求

的是收益的最大化,由于没有建立产品质量和成本之间的必然联系,其成本控制有一定的盲目性.

设计成本的控制有两种策略:为成本设计(design for cost, DFC)和按成本设计(design to cost, DTC)^[23-24].DFC 是指在满足产品技术性能的条件下尽量降低产品成本;DTC 是指在一定的成本范围内设计尽量满足用户需求的产品.本文根据大型离散制造企业产品结构特点,提出一种 DFC 策略的多级产品设计成本优化控制模型即产品结构或与树模型.和上述相关模型相比本模型具有以下特点:充分考虑了用户对产品的质量需求、供应商对外购物料的影响、产品的工艺要求、产品设计和生产的结合;通过对产品的自制件、外购件、原材料和工艺的综合成本优化实现对产品成本的全面控制;通过采用以单级产品结构与或树为单元的自顶向下的优化过程,可实现产品设计成本的从宏观到微观的持续控制.

1 产品设计的结构与或树配置模型

1.1 产品部件设计和工艺设计的多级综合结构模型

大型离散制造企业的产品具有品种多、数量少、规格多变、结构复杂等特点,其产品设计一般分为产品的初步结构方案设计、主件的详细结构方案设计、零部件的材料设计和工艺设计等^[25].为了得到用户和企业都满意的产品,在自顶向下的每一设计过程中都要对多种方案进行优化比较.为了进行产品质量和成本的双重控制,减少产品重复设计的次数和设计周期,在产品的结构方案设计中要尽量考虑到零部件的原材料/外购件、工艺等对产品综合性能质量和成本的影响.为此,产品的设计可以表示为一种产品部件设计和工艺设计的多级综合结构模型,如图 1 所示.该模型是一个包括零部件、原材料/外购件和制造工艺的一个多级产品结构树,称为产品的多级 BOMP (bill of material/process).

产品的多级 BOMP 不但描述了产品(包括主件和零部件)的层次结构关系、各层物料制造单位上层物料所需的数量(quantity per assembly, QPA)和单位,同时还表示了产品的制造工艺和所需的外购件/原材料.由于外购件直接从供应商采购,在产品结构中无需进一步分解.外购件和原材料统称为外购物料.在产品多级 BOMP 中树叶节点都是外购物料.内节点分为自制物料(包括产品和零部件)和制造工艺.自制物料都需要分解,它们都有自己的 BOMP.

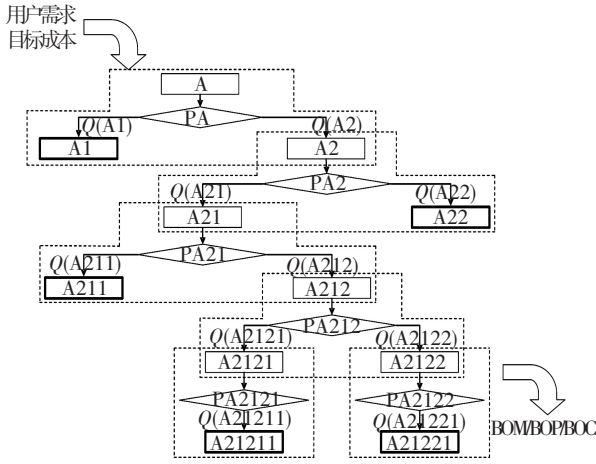


图 1 产品的多级 BOMP

在产品 BOMP 中,每个物料(包括自制物料和外购物料)有一个唯一的标识码,称为物料代码,用“X”表示,如 A、A1 等。物料 X 的制造工艺用“PX”表示。因此, PX 也是唯一的,称为工艺代码。如 PA 表示由物料 A1 和 A2 制造成 A 的工艺过程。物料 X 的 QPA 数量用 Q(X) 表示。如 Q(A1) 和 Q(A2) 分别表示制造单位 A 所需的物料 A1 和 A2 的数量分别为 Q(A1) 和 Q(A2)。

产品的多级 BOMP 是由单级 BOMP 构成。图 2 所示是一个产品的单级 BOMP。在图 2 中, X 表示所设计的产品(包括各级产品,如主件和零部件), PX 表示制造 X 的工艺过程, X1 表示企业的自制物料,它也有自己的单级 BOMP。Xi 和 Xl 分别表示外购物料。在单级 BOMP 中,产品 X 也称为父件(或父节点),物料 X1、Xi 和 Xl 也称为子件(或子节点), Q(X1)、Q(Xi) 和 Q(Xl) 分别表示制造单位父件 X 所需子件 X1、Xi 和 Xl 的 QPA 数量,工艺 PX 称为子工艺节点。子件节点和子工艺节点统称为子节点。在产品的单级 BOMP 中,如果父节点的物料代码为 X,则其子件节点和子工艺节点的物料代码分别表示为 Xi(i = 1,2,...) 和 PX。因此,物料代码表示了节点之间的父子关系或兄弟关系。

单级 BOMP 环环相扣构成了产品的多级 BOMP。因此,以产品的单级 BOMP 为单位的设计可实现产品由粗到细的设计和并行设计,从而进行产品设计成本的由粗到细的优化控制和并行优化控制。

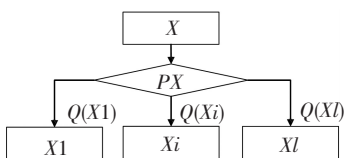


图 2 产品的单级 BOMP

1.2 产品结构与或树

图 2 所示的单级 BOMP,其每个组成物料和制造工艺可能存在多个可选,如图 3 所示。根据它们的组合配置可生成多个父产品。如 X 的一个具体组合方案可表示为 $X(1) = \{Q(X1(1)) \times X1(1), \dots, Q(Xl(1)) \times Xl(1), PX(1)\}$ 。假设图 3 中的产品 X 由一个制造工艺 PX 和 3 个物料 X1、X2 和 X3 组成,并且 PX、X1、X2 和 X3 各有 2 种可选,则一共可以生成 $2 \times 2 \times 2 \times 2 = 16$ 种具体的产品 X。具有这种通过可选件组合生成的产品 BOMP 称为产品结构与或树 BOX (bill of X-material/X-process)。

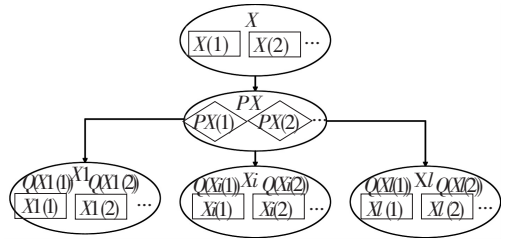


图 3 单级产品结构与或树

定义 1 由物料集和工艺集组成的 BOMP 称为产品结构与或树 BOX。特别地,每个物料集和工艺集中只有一个元素的 BOX 称为产品结构树(即 BOMP)。如果产品结构是单级的,则相应的称为单级产品结构(与或)树;如果产品结构是多级的,则相应的称为多级产品结构(与或)树。

从生成父产品的角度看,一个具体的父产品方案是物料集和工艺集的一种组合方案。因此,图 3 所示的产品结构与或树可表示为图 4。在图 4 中可不严格区别物料集和工艺集(统称为子件集)。由此,一个具体父产品方案可表示为它的子件集的一个组合,而所有的父产品方案可表示为各个子件集的笛卡尔积。在产品 BOX 中, P 称为父件的定义或对象,它规定了父件的各种技术属性。P(i) 表示父件的一个实例;同样地, Pi 称为子件的定义或对象, pij 为子件的一个实例,每个子件实例隐含它的 QPA 数量 Q(pij)。一个单级产品 BOX 可表示为

$$P = \{P_1, P_2, \dots, P_m\},$$

$$P_i = \{p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{in_i}\} (i = 1, 2, \dots, m).$$

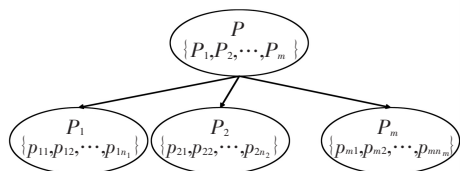


图 4 单级产品结构与或树的描述

产品对象和产品 BOX 的区别是:先由各个子件对象生成各个子件的实例集,然后由子件实例的各种组合生成父件对象的实例集,从而得到了产品 BOX.因此,产品对象表现为产品的属性描述,产品实例表现为属性的具体值,产品 BOX 则是产品对象和产品实例的综合描述.这里的产品属性主要指质量属性和成本属性.

2 产品组成子件之间的相关性

产品组成子件之间的相关性用来表示产品满足工艺需求的可加工/装配性.产品的可加工性就是利用现有的物料(包括外购物料和自制物料)和加工工艺能否加工成所需的产品,在产品的单级 BOMP 中表现为子件节点和工艺节点之间的相容性或相斥性;产品的可装配性就是利用现有的物料(包括外购物料和自制物料)能否装配成所需的产品,在产品的单级 BOMP 中表现为子件节点之间的相容性或相斥性.产品的可加工性和可装配性统称为产品满足工艺要求的可制造性.如图 5 所示,图中产品 X 可能有 $2 \times 2 \times 2 = 8$ 种配置,材料 X1(2) 和工艺 PX(1) 相容,则材料 X1(2) 可经过工艺 PX(1) 加工;材料 X1(2) 和工艺 PX(2) 相斥,则材料 X1(2) 不能经过工艺 PX(2) 加工;材料 X1(2) 和 X2(1) 相斥,则二者不能进行装配;材料 X1(1) 和 X2(2) 相容,则二者可进行装配.考虑到工艺需求的可制造性,产品 X 的配置数目会大大减少.因此,尽早考虑产品的可制造性乃是避免产品重复设计的一个重要措施.

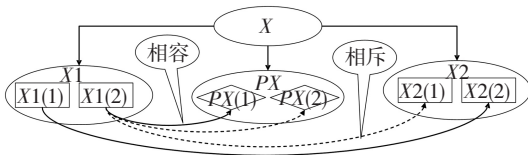


图 5 产品组成子件之间的相关性

相容性和相斥性的定义如下:

定义 2 对于集合 P_i 中的子件元素 p_{ir} ($1 \leq r \leq n_i$), 存在 P_j ($j \neq i$) 中的子集 $P_j^{ir}, P_j^{ir} \subseteq P_j$, 使得子件元素 p_{ir} 与 P_j^{ir} 中的任何一个子件元素能够进行组合制造(这里只考虑两个子件元素之间的可制造性,如果考虑和其他子件元素的可制造性则不一定能制造成最终产品), 则称为子件元素 p_{ir} 与子件集 P_j^{ir} 相容(亦即与其中的每一个元素相容), 记为: $p_{ir} \rightarrow P_j^{ir}$. 集合 P_j^{ir} 称为子件 P_j 对于子件元素 p_{ir} 的相容集.

定义 3 对于集合 P_i 中的子件元素 p_{ir} , 存在

P_j ($j \neq i$) 中的子集 $P_j^{ir}, P_j^{ir} \subseteq P_j$, 使得子件 p_{ir} 与 P_j^{ir} 中的任何一个子件都不能进行组合制造, 则称为子件元素 p_{ir} 与子件集 P_j^{ir} 相斥(亦即与其中的每一个元素相斥), 记为: $p_{ir} \times P_j^{ir}$. 集合 P_j^{ir} 称为子件 P_j 对于子件元素 p_{ir} 的相斥集.

定义 4 如果 $p_{ir} \rightarrow P_j^{ir}$ 并且 $p_{ir} \times \overline{P_j^{ir}}$, 则称 P_j^{ir} 为子件 P_j 对于子件元素 p_{ir} 的满相容集.

定义 5 如果 $p_{ir} \times P_j^{ir}$ 并且 $p_{ir} \rightarrow \overline{P_j^{ir}}$, 则称 P_j^{ir} 为子件 P_j 对于子件元素 p_{ir} 的满相斥集.

由定义 4 和定义 5 可以得出, 同一个子件集对于另一个子件集中的同一个子件元素, 可划分为两个子集, 即满相容集和满相斥集. 满相容集和满相斥集具有特殊的意义. 由定义 4 和定义 5 还可得出, 同一个子件对于同一个子件元素的满相容集和满相斥集互补, 即 $p_{ir} \times P_j^{ir}$ 等价于 $p_{ir} \rightarrow \overline{P_j^{ir}}$. 因此, 对满相斥集的讨论可转化为对满相容集的讨论. 以下只考虑满相容关系.

1) 相容性. 先讨论一特殊情况, $p_{11} \rightarrow \{p_{31}, p_{32}, p_{33}\}$. 该式表示 p_{11} 与 p_{31} 相容或者 p_{11} 与 p_{32} 相容或者 p_{11} 与 p_{33} 相容, 则对应的决策变量之间存在关系: $x_{11} - x_{31} \leq 0$ 或者 $x_{11} - x_{32} \leq 0$ 或者 $x_{11} - x_{33} \leq 0$. 即三者之中有一个成立, 或者等价于 (x_j 为 0/1 变量)

$$\begin{cases} x_{11} - x_{31} \leq 0 \\ x_{11} - x_{32} \leq 1 \\ x_{11} - x_{33} \leq 1 \end{cases} \begin{cases} x_{11} - x_{31} \leq 1 \\ x_{11} - x_{32} \leq 0 \\ x_{11} - x_{33} \leq 1 \end{cases} \begin{cases} x_{11} - x_{31} \leq 1 \\ x_{11} - x_{32} \leq 1 \\ x_{11} - x_{33} \leq 0 \end{cases}$$

为此引入 3 个变量: $y_1, y_2, y_3 \in \{0, 1\}$, 上述条件可表示为

$$\begin{cases} x_{11} - x_{31} \leq y_1, \\ x_{11} - x_{32} \leq y_2, \\ x_{11} - x_{33} \leq y_3, \\ y_1 + y_2 + y_3 = 3 - 1, \\ y_1, y_2, y_3 \in \{0, 1\}. \end{cases}$$

2) 一般相容性. 设 $p_{ir} \in P_i$ ($i = 1, 2, \dots, m; r = 1, 2, \dots, n_i$), $p_{js} \in P_j^{ir} \subseteq P_j$ ($j = 1, 2, \dots, m; j \neq i$), $n_j^{ir} = |P_j^{ir}|$. 如果存在相容关系 $p_{ir} \rightarrow P_j^{ir}$, 并且 $p_{ir} \times \overline{P_j^{ir}}$, 则引入 n_j^{ir} 个二元变量 y_{jk}^{ir} ($k = 1, 2, \dots, n_j^{ir}$), P_i 和 P_j 中每个子件元素对应的二元变量分别为 x_{ir} 和 x_{js} , 则这种相容性可描述为

$$\begin{cases} x_{ir} - x_{js} \leq y_{jk}^{ir}, \\ \sum_{k=1}^{n_j^{ir}} y_{jk}^{ir} = n_j^{ir} - 1, \\ y_{jk}^{ir} \in \{0, 1\}. \end{cases}$$

3 产品设计成本优化控制模型

单级产品 BOX 的优化就是如何生成一个成本最优的单级产品 BOMP. 如图 4 所示产品 P 的单级 BOX, 它由 m 个子件 $P_i (i = 1, 2, \dots, m)$ (每个子件代表一种物料或一种工艺) 组成, 每个子件分别是一个子件集 $P_i = \{p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{in_i}\} (i = 1, 2, \dots, m)$, 每个子件实例 p_{ij} 的成本值为 c_{ij} , 质量权重为 q_{ij} , 单级产品 P 的 BOX 的优化过程就是选择每个子件 $P_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 的一个实例从而得到一个成本最优的产品 P 的 BOMP 的过程. 为了表示子件的某个实例选与不选, 对应每个子件的实例 p_{ij} 设置一个相应的决策变量 x_{ij} . 如果该子件的实例被选, 则 $x_{ij} = 1$, 否则 $x_{ij} = 0$. m 个子件集 P_i 一共可配置成产品 P 的实例方案集为 $\{p_1, p_2, \dots, p_m\}$, 但并不是每个产品实例方案都满足工艺要求. 产品 P 的 BOX 的优化必须满足产品工艺的可制造性, 同时产品 P 的 BOX 的优化还必须满足用户对产品的质量需求 Q_0 . 以 c_{BOMP} 表示产品 P 的综合设计成本, q 表示产品 P 的质量权重, 单级产品 P 的 BOX 的设计成本的优化模型可表示为

$$\min c_{BOMP} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} c_{ij} x_{ij}. \quad (1)$$

$$q = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} q_{ij} x_{ij} \geq Q_0. \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^{n_i} x_{ij} \leq 1, \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (3)$$

$$x_{ir} - x_{js} \leq y_{jk}^{ir}, \quad k = 1, 2, \dots, n_j^{ir}. \quad (4)$$

$$\sum_{k=1}^{n_j^{ir}} y_{jk}^{ir} = n_j^{ir} - 1. \quad (5)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n_i. \quad (6)$$

$$y_{jk}^{ir} \in \{0, 1\}, \quad k = 1, 2, \dots, n_j^{ir}. \quad (7)$$

式(1)指的是成本目标函数最优. 式(2)表示的是满足最低质量约束. 式(3)表示产品 P 只能从每个子件集中最多选择一个子件实例, 如果对于某个 i , $\sum_{j=1}^{n_i} x_{ij} = 0$, 则表示某子件 P_i 不选. 式(4)、(5)表示的是子件实例之间的相容性(本模型假设只存在相容关系 $p_{ir} \rightarrow P_j^{ir}$, 如果存在其他的相容关系, 则可依照相容性的描述增添类似的约束关系式). 式(6)、(7) 分别是变量约束. 由式(1) ~ (7) 表示的是产品的设计成本优化模型.

产品的设计成本优化模型 Opt-BOMP 表示根据产品 P 的各个子件实例 p_{ij} 的成本和质量 (c_{ij} , q_{ij}) ($i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n_i$), 在满足产品 P 的质量需求 Q_0 和子件实例相关性条件下确定该

子件实例选与不选(即确定该子件实例对应的变量 x_{ij} 的值)的过程. 一般地, 当所选子件实例 p_{ij} 的成本值 c_{ij} 越小时, 其质量权重 q_{ij} 也越小, 虽然产品 P 的设计成本 c_{BOMP} 降低了, 但其质量权重 q 可能不能满足 Q_0 的需求; 反之如果所选子件实例 p_{ij} 的成本值 c_{ij} 越大时, 其质量权重 q_{ij} 也越大, 虽然产品 P 的质量权重 q 能够满足 Q_0 的需求, 但其设计成本 c_{BOMP} 可能大幅度增加, 没有达到降低成本的目的. 因此, 成本优化模型 Opt-BOMP 要求在产品 P 的多个组成子件实例 p_{ij} 的成本和质量之间进行综合平衡, 得到一组变量 $x_{ij} (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n_i)$ 的最佳值, 从而得到产品 P 的一个成本最优的 BOMP.

多级产品 BOX 的优化是以单级产品 BOX 为单位采用自顶向下的方式逐层进行, 如图 6 所示. 下层产品的优化结果必须满足上层产品的质量和成本要求. 如果下层产品的优化结果不能满足上层产品的质量和成本要求, 就要将优化结果反馈到上层, 上层产品根据下层产品的反馈信息进行分析和相应的修改, 再对下层产品重新进行优化. 这一过程反复进行直到上层产品的要求得到满足.

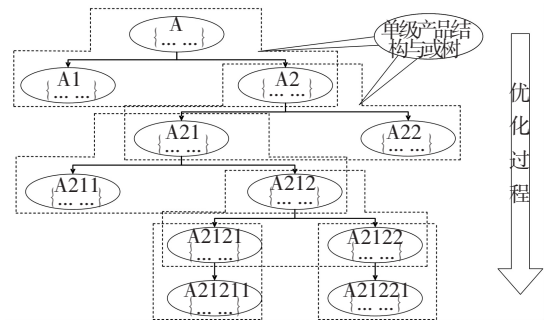


图 6 多级产品结构树与或树的优化过程

产品的成本是一个定量的量. 在多级产品 BOX 中, 从底层节点向上层节点是一个逐层累加的过程. 产品的质量权重是一个定性的量, 它是利用产品的单级 BOX 中父产品的质量准则进行评估的值. 因此, 产品的质量权重只在本产品的单级 BOX 中有效, 而不应保留到其他产品的单级 BOX 中. 为此, 对每一级产品 BOX 进行优化时, 专家需要重新进行产品质量的评估并给出父产品的质量应达到的最低要求(质量权值的下限).

4 产品设计成本优化控制仿真结果

通过一个示例验证本文所提出的成本控制模型 Opt-BOMP 的有效性. 某企业的某种产品结构如图 7 所示. 其中 PA 有 2 个可选件 PA_1, PA_2 . A_1 和 A_2 分别有 3 个可选件 A_{11}, A_{12}, A_{13} 和 $A_{21},$

A_2 、 A_3 、 PA_1 和 PA_2 分别有 2 个可选件 PA_{1_1} 、 PA_{1_2} 和 PA_{2_1} 、 PA_{2_2} 。最底层零件 A_{11} 、 A_{12} 、 A_{13} 和 A_{21} 、 A_{22} 、 A_{23} 的可选件分别为 A_{11_1} 、 A_{11_2} 、 A_{11_3} 、 A_{12_1} 、 A_{12_2} 、 A_{13_1} 、 A_{13_2} 和 A_{21_1} 、 A_{21_2} 、 A_{22_1} 、 A_{22_2} 、 A_{23_1} 、 A_{23_2} 、 A_{23_3} 。每个可选件的质量权值和成本值如表 1 所示,各可选件之间的相关性如图 8 所示。

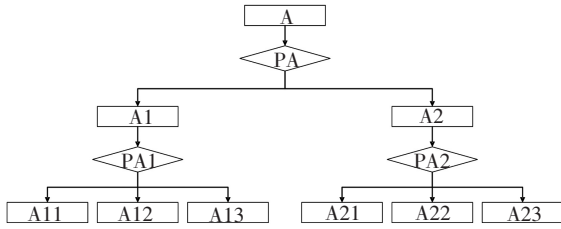


图 7 产品结构的示例

表 1 产品的各可选件的质量权值和成本值

零部件	可选件(质量权值,成本值)
PA	$PA_1(0.16,560)$ 、 $PA_2(0.17,620)$
A1	$A_{1_1}(0.13,430)$ 、 $A_{1_2}(0.11,390)$ 、 $A_{1_3}(0.08,350)$
PA1	$PA_{1_1}(0.18,170)$ 、 $PA_{1_2}(0.12,105)$
A11	$A_{11_1}(0.11,85)$ 、 $A_{11_2}(0.05,30)$ 、 $A_{11_3}(0.08,40)$
A12	$A_{12_1}(0.13,110)$ 、 $A_{12_2}(0.05,25)$
A13	$A_{13_1}(0.15,135)$ 、 $A_{13_2}(0.14,120)$
A2	$A_{2_1}(0.15,690)$ 、 $A_{2_2}(0.03,350)$ 、 $A_{2_3}(0.17,640)$
PA2	$PA_{2_1}(0.08,130)$ 、 $PA_{2_2}(0.16,190)$
A21	$A_{21_1}(0.02,35)$ 、 $A_{21_2}(0.09,140)$
A22	$A_{22_1}(0.07,120)$ 、 $A_{22_2}(0.25,210)$
A23	$A_{23_1}(0.17,200)$ 、 $A_{23_2}(0.05,90)$ 、 $A_{23_3}(0.11,150)$

利用本文所提出的模型 Opt-BOMP 进行产品设计自顶向下的优化过程中,对产品质量的限量值分别取产品子件的所有可选件的平均值。如果下层产品的优化结果不能满足上层产品的优化目标,则通过修改上层产品的设计方案直到下层产品的优化结果满足上层产品的优化目标为止。或者当遇到下层产品的质量权值的和小于上层产品的质量权值下限时,则通过对每个下层产品提供更多的可选件直到存在下层产品的质量权值的和大于上层产品的质量权值下限时为止。

产品设计成本主要有 DFC 和 DTC 两种控制策略。本文的成本控制模型 Opt-BOMP 是基于 DFC 的,即在满足产品技术性能的条件下尽量降低产品成本。为了进一步验证该成本控制模型的效果,本文将改造为基于 DTC 的成本控制模型,即在一定的成本范围内设计尽量满足用户需求(质量)的产品。和模型 Opt-BOMP 不同的是,DTC 成本控制模型的约束条件是产品成本而优化目标是产品质量。优化结果如表 2 所示。

可选件		相关性					
		A1			A2		
A		A1 ₁	A1 ₂	A1 ₃	A2 ₁	A2 ₂	A2 ₃
PA	PA ₁	*				*	
	PA ₂		*		*		
A1	A1 ₁	△	△	△	*		
	A1 ₂	△	△	△			
	A1 ₃	△	△	△	*		
A1	A11			A12		A13	
	A11 ₁	A11 ₂	A11 ₃	A12 ₁	A12 ₂	A13 ₁	A13 ₂
PA1	PA1 ₁	*			*		
	PA1 ₂	*				*	
A11	A11 ₁	△	△	△			
	A11 ₂	△	△	△		*	*
	A11 ₃	△	△	△			
A12	A12 ₁	△	△	△	△	△	
	A12 ₂	△	△	△	△	△	*
A2	A21		A22		A23		
	A21 ₁	A21 ₂	A22 ₁	A22 ₂	A23 ₁	A23 ₂	A23 ₃
PA2	PA2 ₁		*				*
	PA2 ₂			*			
A21	A21 ₁	△	△				
	A21 ₂	△	△	*			*
A22	A22 ₁	△	△	△	△		
	A22 ₂	△	△	△	△		

注: * 为相斥关系;△为相关关系

图 8 产品各可选件之间的相关性

表 2 不同模型所得到的产品优化方案

零部件	最优方案(质量权值,成本值)	
	DTC-BOMP	Opt-BOMP
A	A(0.47,1630)	A(0.44,1460)
PA	PA ₂ (0.17,620)	PA ₁ (0.16,560)
A1	A1 ₁ (0.13,430)	A1 ₂ (0.11,390)
PA1	PA1 ₂ (0.12,105)	PA1 ₂ (0.12,105)
A11	A11 ₃ (0.08,40)	A11 ₃ (0.08,40)
A12	A12 ₁ (0.13,110)	A12 ₁ (0.13,110)
A13	A13 ₂ (0.14,120)	A13 ₂ (0.14,120)
A2	A2 ₃ (0.17,640)	A2 ₃ (0.17,640)
PA2	PA2 ₂ (0.16,190)	PA2 ₂ (0.16,190)
A21	A21 ₁ (0.02,35)	A21 ₁ (0.02,35)
A22	A22 ₂ (0.25,210)	A22 ₂ (0.25,210)
A23	A23 ₁ (0.17,200)	A23 ₂ (0.05,90)

注:成本节省率为(1630-1460)/1630=10.4%。

由表 2 可知,两种模型在对产品优化过程中得到了不同的优化结果。首先在对第 0 层产品 A 优化后,对于子工艺 PA,利用 DTC 模型得到的可选件是 PA₂,其成本为 620,而模型 Opt-BOMP 得到的可选件是 PA₁,其成本为 560。对于子产品 A1,模型 DTC 和 Opt-BOMP 得到的可选件分别是 A1₁ 和 A1₂,成本分别为 430 和 390。显然,Opt-BOMP 得到的产品成本优于 DTC 得到的产品成本。其次在对第 1 层产品 A2 优化后,DTC 模型得到子产品 A23 的可选件是 A23₁,而 Opt-BOMP 得到的是 A23₂,二者的成本分别是 200 和 90。综合整个产品的设计方案,模型 DTC 和 Opt-BOMP 得到的产品的成本分别是 1 630 和 1 460。由此可见,本文所提出的基于 DFC 的模型 Opt-BOMP 较之 DTC 模型能够获得成本更优的产品设计方案。

5 结 语

本文所提出的产品设计成本的优化模型 Opt-BOMP 中的变量都是整数型,因此该模型是一个整数规划模型,属于 Np hard 问题.当问题规模较小时一般能够在有限的时间内可以求得问题的最优解(通常可以利用软件包如 LINDO 求解);当问题规模较大时一般很难在有限的时间内求得问题的最优解,因此需要针对该问题设计有效的启发式算法进行求解.

参 考 文 献

- [1] 陈胜群. 现代成本管理论[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 1998.
- [2] SHEHAB E M, ABDALLA H S. Manufacturing cost modeling for concurrent product development [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2001, 17(4): 341-353.
- [3] PANTELAKIS S G, BAXEVANI E A. Optimization of the diaphragm forming process with regard to product quality and cost [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing (Incorporating Composites and Composites Manufacturing), 2002, 33(4): 459-470.
- [4] JUNG H W, HOI B J. Optimization models for quality and cost of modular software systems[J]. European Journal of Operational Research, 1999, 112(3): 613-619.
- [5] TANG J F, MU L F, KWONG C K, et al. An optimization model for software component selection under multiple applications development [J]. European Journal of Operational Research, 2011, 212(2): 301-311.
- [6] AKGUNDUZ A, ZETU D, BANERJEE P, et al. Evaluation of sub-component alternatives in product design processes[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2002, 18(1): 69-81.
- [7] AGARD B, BASSETTO S. Modular design of product families for quality and cost[J]. International Journal of Production Research, 2012, 51(6): 1648-1667.
- [8] BODE J, FUNG R Y K. Cost engineering with quality function deployment [J]. Computers & Industrial Engineering, 1998, 35(3/4): 587-590.
- [9] HASSAN A, SIADAT A, DANTAN J Y, et al. Conceptual process planning-an improvement approach using QFD, FMEA, and ABC methods[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2010, 26(4): 392-401.
- [10] HSIAO S W. Concurrent design method for developing a new product [J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2002, 29(1): 41-55.
- [11] PITIPONG V, SURENDRA M G. A combinatorial cost-benefit analysis methodology for designing modular electronic products for the environment [C]// Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment. Washington, DC: IEEE, 1999: 268-273.
- [12] SHARIT J, CZAJA S J, PERDOMO D, et al. Cost-benefit analysis methodology for assessing product adoption by older user populations [J]. Applied Ergonomics, 2004, 35(2): 81-92.
- [13] CHEN Y M, LIU J J. Cost-effective design for injection molding [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 1999, 15(1): 1-21.
- [14] CHOI J W. Architecture of a knowledge based engineering system for weight and cost estimation for a composite airplane structures[J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36(8): 10828-10836.
- [15] BERNET N, WAKEMAN M D, BOURBAN P E, et al. An integrated cost and consolidation model for commingled yarn based composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing (Incorporating Composites and Composites Manufacturing), 2002, 33(4): 495-506.
- [16] LIN T, LEE J W, BOHEZ E L J. New integrated model to estimate the manufacturing cost and production system performance at the conceptual design stage of helicopter blade assembly[J]. International Journal of Production Research, 2012, 50(24): 7210-7228.
- [17] RAVIART D, SÉNÉCHAL O, TAHON C. Methodology for a physico-economic product evaluation, starting in the design phase [J]. Control Engineering Practice, 1998, 6(4): 489-498.
- [18] WEUSTINK I F, BRINKE E T, STREPPPEL A H. A generic framework for cost estimation and cost control in product design [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 103: 141-148.
- [19] 谭建荣, 王世伟, 张树有. 面向大批量定制的产品成本估算方法研究[J]. 中国机械工程, 2003, 14(7): 576-580.
- [20] 赵平, 孙树栋. 基于组合模糊神经网络的建设工程成本估算方法[J]. 计算机工程与应用, 2005, 28: 174-176.
- [21] 柏晖, 费树岷. 基于遗传算法的纺织企业机配件库存控制[J]. 工业控制计算机, 2011, 24(11): 62-63.
- [22] 贾震, 李天虹. 建设项目成本控制审计监督的模型分析[J]. 西安交通大学学报, 2001, 35(S1): 51-54.
- [23] DOWLATSHAHI S. Product design in a concurrent engineering environment: an optimization approach[J]. International Journal of Production Research, 1992, 30(8): 1803-1818.
- [24] CHEN C H, CHONG Y T, CHANG W, et al. A quality-time-cost oriented strategy for product conceptualization[J]. Advanced Engineering Informatics, 2012, 26(1): 16-25.
- [25] 柴邦衡. 设计控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002. (编辑 张红)