

顾客需求驱动的产品配置优化

周春景, 林志航, 刘春涛

(西安交通大学制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 提出一种顾客需求驱动的产品配置优化方法. 该方法针对现有产品族模型用于配置设计中存在的问题, 构造了支持产品配置的设计空间, 并运用联合分析方法将顾客期望分解为各产品特性的质量效用. 在此基础上, 同时考虑大批量定制产品的质量效用和成本, 以“效费比”最大为目标, 建立了产品优化配置数学模型, 并采用遗传算法对其进行求解, 从而达到了顾客满意度和成本之间的平衡——最优配置方案. 以笔记本电脑的优化配置为例, 证明了所提出的优化配置方法可为获取顾客满意的最优配置方案提供行之有效的途径.

关键词: 配置优化; 大批量定制; 联合分析; 遗传算法

中图分类号: TH122 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)03-0339-05

Customer Requirements-Driven Product Configuration Optimization

Zhou Chunjing, Lin Zhihang, Liu Chuntao

(State Key Laboratory of Manufacturing System Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A new approach for customer-driven product configuration optimization is proposed. Configuration space against the defects of product family model is constructed for targeting diversity of customer needs and conjoint analysis is applied to decompose the customer preference into the utility of different product attributes. Subsequently, a mathematic model to maximize the ratio between the overall utility and cost from both customers and manufacturers perspectives is formulated, and a genetic algorithm is adopted to solve this combinatory optimization problem. A case study of notebook computer is then reported to illustrate the validity of the proposed method and associated algorithms, which demonstrates that the proposed approach provides an effective means for assemble-to-order manufacturing enterprises to acquire the customer-satisfied configuration solution.

Keywords: configuration optimization; mass customization; conjoint analysis; genetic algorithm

产品配置设计作为企业实现大批量定制的关键技术之一, 目前受到了国内外学者的广泛关注. 然而, 已有的配置方法^[1-3]大多是在知识和约束推理的基础上以获得满足顾客定制需求的可行配置方案为目标, 而对于如何获取满足定制需求的最优配置方案则较少涉及. 王海军等人^[4]在研究产品模块化设计时, 以定制产品性能和顾客需求的相关度最大为目标, 建立了模块化产品配置设计的数学模型, 但该模型仍存在着一定的局限性.

在前人研究成果的基础上, 针对这些成果存在的问题, 本文提出了一种顾客需求驱动的产品优化配置方法. 该方法首先构造面向配置的产品族设计空间——配置空间, 将配置设计定义为配置空间的模块组合, 然后基于联合分析(CA)对顾客的需求进行处理, 获得配置空间中各产品特性的质量效用. 在此基础上, 同时考虑定制产品的成本, 建立以单位成本效用最大为目标函数、成本可行为约束的优化配置数学模型, 并采用遗传算法(GA)对该组合优化问

题进行求解,以确保高效获取顾客满意的最优配置方案。

1 产品优化配置建模

大批量定制思想的核心是设计和定制分离的模式,其中设计的主要内容是模块化产品族,而定制则主要指配置设计环节,二者之间通过产品族模型建立关联。为了有效支持产品的优化配置,文中采用配置空间对产品族的构成元素及其之间的关系进行描述,并在利用 CA 实现对顾客期望建模的基础上,建立了产品优化配置数学模型。

1.1 配置空间

配置空间是所有可能配置方案的集合,其以统一模型直观地描述了产品族的构成元素及其之间的相互关系。图1为基于“与/或”图表示的配置空间层次结构,根节点表示产品族,图中的配置空间由 N 个可能的配置方案 $\{P_i\}$ 经由“与”关系构成,而每个配置方案则可以对 k 个可配置模块 $\{M_k\}$ 加以配置获得,每个可配置模块又相应地包含若干个可选的模块实例 $\{m_{kl}\}$,配置设计就是根据顾客需求来合理选定模块实例并加以组合。为了便于顾客理解各模块实例,相应地将每个模块实例表征为产品特性(包含功能特性和设计参数) $\{a_{kl}\}$ 及其对应的特性值 $\{v_{klq}\}$ 。此外,配置空间中包含的配置约束则定义了模块实例之间的组合和互斥关系,如对于接口不一致而不能共存于同一配置方案的2个模块实例,二者之间具有互斥关系^[5]。

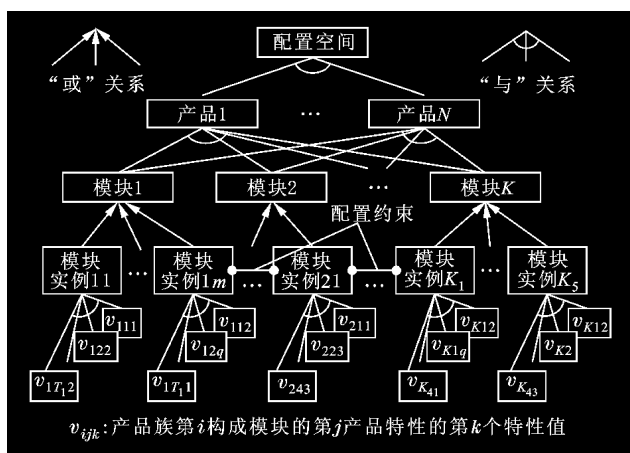


图1 配置空间的层次结构

配置空间清晰地刻画了多样性的模块实例组合,将模块实例表示为相应的特性,有利于建立各模块和顾客之间的关联,以获取顾客偏好信息作为产品配置优化的指标。本文正是在配置空间的基础上,通过 CA 来获得顾客偏好信息的,因此配置空间的

建立为顾客驱动的产品配置优化奠定了良好的基础。

1.2 基于 CA 的顾客需求处理

准确理解顾客定制需求是获得产品优化配置方案的前提,CA 是一种有效的顾客偏好建模方法,它将顾客对产品的整体偏好分解到产品各特性上,用产品特性对顾客偏好的贡献,即产品各特性的质量效用(utility)来反映顾客对产品的整体偏好^[6]。

运用 CA 获取配置空间产品各特性值对应的质量效用,首先从图1所示配置空间中,选择一组产品来测试顾客对产品的整体偏好,其中产品可表示为特征值向量,即 $P_i = \{v_{klq} | k=1, \dots, K; l=1, \dots, T_k; q=1, \dots, q_t\}$ 。由顾客根据自身偏好,采用 9 等级打分的方式对产品进行评估,并获得顾客整体偏好的量化评估结果。在此基础上,采用式(1)所示的哑元回归分析获取产品各特性的质量效用

$$U_i = a + \sum_{k=1}^{K_s} \sum_{l=1}^{T_k} \sum_{q=1}^{q_t} u_{klq} y_{klq} + \varepsilon \quad (1)$$

式中: $y_{klq} \in \{0, 1\}$ 为哑变量,当试验产品中包含产品特性值 v_{klq} 时, $y_{klq} = 1$, 反之 $y_{klq} = 0$; u_{klq} 为产品特性值 v_{klq} 所对应的质量效用; a 为截距; ε 为误差项。

由上述顾客需求处理过程可知,基于 CA 所得产品特性的质量效用由其特性值和顾客偏好二者共同决定,是从顾客角度对产品特性所能满足需求能力的综合度量,以此为指标引导产品配置优化,能够有效地获取顾客满意的配置方案。

1.3 优化配置数学模型

大批量定制是企业实行产品优化配置以最低成本来获取顾客满意的有利措施。在获取配置空间各产品特性质量效用的基础上,综合考虑定制产品的质量效用、成本以及配置空间各模块实例在配置方案中的存在性,以定制产品的最大效费比为目标,建立产品优化配置的数学模型,其目标函数为

$$F = \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^{L_k} U_{kl} x_{kl} / \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^{L_k} C_{kl} x_{kl} \quad (2)$$

$$U_{kl} = \sum_t \sum_q u_{klq} y_{klq} \quad (3)$$

式中: C_{kl} 为模块实例的成本; $x_{kl} \in \{0, 1\}$ 为二元设计变量,表示配置空间模块实例 m_{kl} 在配置方案中的存在性,当 $x_{kl} = 1$ 时,表示该模块实例被配置,当 $x_{kl} = 0$ 时,则表示未被配置; U_{kl} 为配置空间中各模块实例的质量效用,即各模块实例对顾客满意度的贡献,并由各模块实例特性的质量效用共同决定。此外,目标函数还应该满足以下约束条件。

(1)顾客选择约束用于表示顾客指定产品必须具有某种特性的情况,如 $y_{111}=1$,表示顾客要求产品特性 a_{11} 对应的特性值为 v_{111} 。

(2)成本约束能够保证定制产品的总成本必须小于顾客的预算,可表示为

$$C_P = C_F + \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^{I_k} C_{kl} x_{kl} \leq C_B \quad (4)$$

式中: C_P 为配置某产品所需的总成本; C_B 为客户所能承受的最高价格; C_F 为定制产品的其他固定成本,如装配成本。由于所有配置方案具有相似的装配过程,因此认为装配成本为一常数,并纳入固定成本。

(3)配置约束通常表示为设计变量上的规则,用于在配置求解过程中对配置方案的可行性进行验证。如规则“如果 $x_{31}=1$,则 $x_{44} \neq 1$ ”表示模块实例 m_{31} 和 m_{44} 不能共存于同一配置方案。

(4)系统约束能够保证在产品优化配置过程中,配置空间的每个构成模块有且只有一个模块实例被选择,可表示为

$$\sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^{I_k} x_{kl} = K, \quad \sum_{l=1}^{I_k} x_{kl} = 1 \quad (5)$$

2 基于 GA 的产品优化配置求解

2.1 个体编码

配置方案由模块构成,模块包含多个实例,每个模块实例又可以表示为相应的模块特性值,本节根据配置空间的层次特性,给出了一种嵌套的个体编码方案。如图2所示,采用十进制数字序列表示个体(配置方案) $V[k]=[x_1, x_2, \dots, x_m]$,其中每一个子序列(染色体片断)表示配置方案的构成模块。个体的组成元素(基因位)表示模块特性,而将每个模块特性值的序号记为集合 $\{1, 2, \dots, q, \dots, q_t\}$,并以此作为各基因位的复等位基因(表示可以出现在同一基因位上的不同基因),该编码方案都能够确保个体满

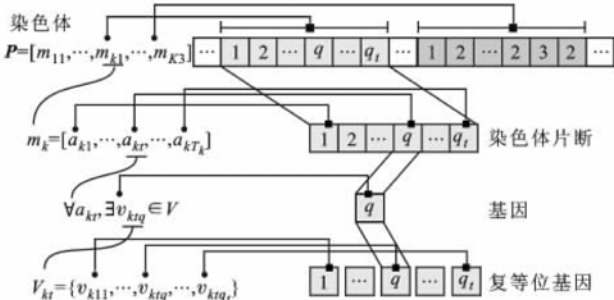


图2 个体编码方案

足配置模型的系统约束。

2.2 GA 的配置优化过程

产品优化配置就是要在满足各种约束的前提下,从配置空间中寻找最优的模块实例组合,使所得配置方案的单位成本效用最大,这是一个典型的组合优化问题,本文采用遗传算法对其实现了有效求解。在图3中,首先根据第3.1节的个体编码方案采用随机生成的方法来初始化种群,获得第一代种群,然后根据式(6)包含的配置约束对个体进行检查并修复所有的非法个体。在此基础上,采用式(2)的目标函数计算个体的适应度,并检查个体是否满足选择约束和成本约束。对不满足约束的个体,经罚函数作用之后,得到新的适应度计算函数

$$F''(V[k]) = \frac{\sum \sum U_{kl} x_{kl} - \beta \max\{U_{kl} x_{kl}\}}{\sum \sum C_{kl} x_{kl}} \quad (6)$$

式中: β 为罚系数,其值可根据具体问题加以确定, β 取值越大,表示惩罚力度越大。判断种群是否满足迭代终止条件,不满足则通过进化操作(选择、交叉和变异)来获得下一代种群,重复上述过程直至满足迭代终止条件。在设计迭代终止条件时,可采用控制进化迭代次数和限制适应度精度相结合的方法。

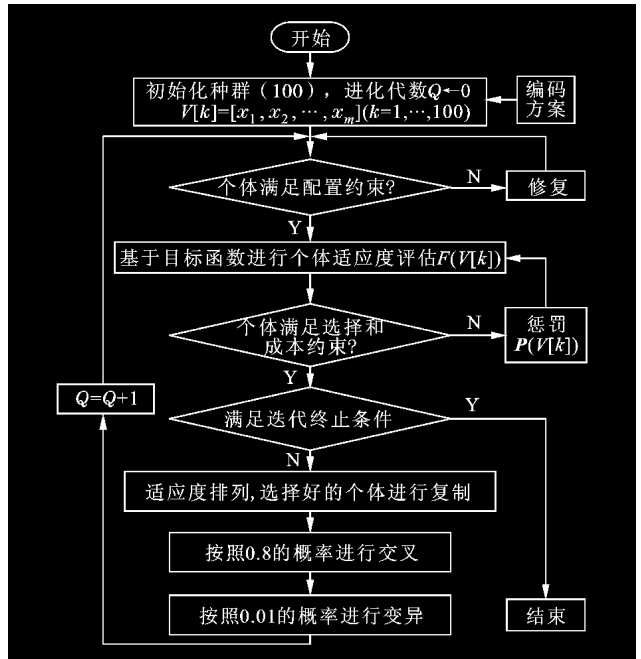


图3 基于 GA 的优化配置求解流程图

3 配置实例

本文以笔记本电脑为例,对所提出方法的有效性进行验证。笔记本电脑是一种典型的可定制产品,其主要构成模块包括处理器、内存、硬盘、显示器、光

驱、主板、外设和机壳等,其中大多数模块都包含有多个模块实例,它们是大批量定制企业满足不同顾客需求的基础。

为了有效支持按订单装配生产模式,某笔记本生产企业首先构建了配置空间,表 1 所示为该配置空间的部分构成元素,同时给出的还有各模块实例的采购成本。此外,还考虑了 CPU、内存和主板模块之间的配置约束,以确保这些模块之间的接口互相匹配,得到的配置约束为“ r_1 : 如果 $y_{611}=1$,则 $y_{211}=1$; r_2 : 如果 $y_{621}=1$,则 $y_{111}=1$; $\cdots$; r_6 : 如果 $y_{623}=1$,则 $y_{113}=1$ ”。

表 1 配置空间的部分构成元素

模块	模块实例	模块实例属性		成本/元
		属性 1 ^①	属性 2 ^②	
CPU	m_{11}	D715(v_{111}) ^③	478Pin(v_{121})	700
	m_{12}	D745(v_{112})	728Pin(v_{122})	800
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
内存	m_{19}	T2400(v_{114})	939Pin(v_{123})	1 350
	m_{21}	400 (v_{211})	128 (v_{221})	100
	m_{22}	400 (v_{211})	256 (v_{222})	220
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
	m_{29}	667 (v_{213})	512 (v_{223})	550
硬盘	m_{31}	4200 (v_{311})	40 (v_{321})	440
	m_{32}	4200 (v_{311})	60 (v_{322})	630
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
	m_{39}	7200 (v_{313})	80 (v_{323})	810
主板	m_{61}	支持 400 MHz(v_{611})	支持 478Pin(v_{621})	1 400
	m_{62}	支持 533 MHz(v_{612})	支持 478Pin(v_{621})	1 500
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
	m_{69}	支持 667 MHz(v_{613})	支持 939Pin(v_{623})	1 950

①:表示各模块分别与类型、频率、转速和接口对应;②:表示各模块分别与现接口、内存容量、硬盘容量对应;③:表示属性 D715 在配置空间中的编码,以下类同。

构建配置空间之后,当顾客提出笔记本电脑的内存容量为 512 MB、显示屏为 45.7 cm 且价格不高于 8 500 元的定制要求时,首先组合表 1 中的产品属性,以此来构建产品的测试轮廓,从而获得顾客对各测试产品的整体偏好,部分产品的测试数据如表 2 所示。

表 2 联合测试数据

编号	CPU 型号	内存		硬盘		顾客偏好
		频率/MHz	容量/MB	转速/r·min ⁻¹	容量/GB	
1	T2400	533	256	4 200	60	2
2	T1300	533	512	5 400	80	9
3	D715	667	512	5 400	40	4
4	D745	400	256	7 200	60	5
5	T1300	400	128	4 200	80	6
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
31	D745	667	512	4 200	40	7
32	D715	533	256	4 200	80	6

在获取联合测试数据的基础上,运行 SPSS 软件的哑元回归分析模块对测试数据进行处理,获得了配置空间中各产品属性对该顾客的质量效用(见表 3)。顾客对内存容量和显示屏尺寸的定制要求则转换为相应的选择约束“ $y_{223}=1, y_{421}=1$ ”。

表 3 产品属性对应的质量效用

属性	效用	属性	效用	属性	效用
v_{111}	0.322	v_{213}	1.164	v_{422}	0.634
v_{112}	0.783	v_{221}	0.495	v_{423}	0.257
v_{113}	0.529	v_{222}	0.626	v_{611}	0.125
v_{121}	0.351	v_{223}	0.121	v_{612}	0.339
v_{122}	0.921	v_{411}	0.721	v_{613}	0.311
v_{123}	0.845	v_{412}	0.364	v_{621}	0.135
v_{211}	0.723	v_{413}	0.925	v_{622}	0.263
v_{212}	0.833	v_{421}	0.910	v_{623}	0.224

综合配置和选择约束来建立优化配置数学模型,其中取 C_F 为 1 500,在此基础上,应用 GA 对其进行求解,并给定 GA 的各参数(种群数量为 100,交叉概率为 0.8,变异概率为 0.01, $\beta=1.2$,精度阈值取为 10^{-6} ,最大迭代次数为 300),不断重复图 3 所示的进化过程直到满足迭代终止条件为止。图 4 为利用 MATLAB 软件所得目标函数的仿真结果,当进化代数超过 235 代时,最优个体为 $V[k]=[2, 2, 2, 2, 3, 1, 3, 2, 1, 2, 2]$,所对应的总效用、成本和目

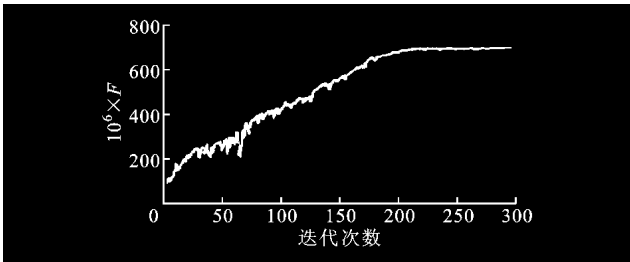


图 4 目标函数的仿真结果

标函数分别为 $U=5\ 991$, $C=8\ 350$, $F=717.5 \times 10^{-6}$, 其精度高于设定阈值, 优化结果稳定, 从而达到了顾客满意度和成本之间的平衡. 因此, 根据配置空间则可以确定配置方案的构成模块为 m_{14} 、 m_{26} 、 m_{34} 、 m_{47} 、 m_{52} 和 m_{65} .

4 结 论

本文提出的顾客需求驱动产品配置优化的方法, 以定制产品“效费比”最大为目标函数, 成本可行性为约束, 建立了基于客户需求驱动的产品优化配置数学模型, 并应用遗传算法对其进行求解, 成功地解决了按订单生产模式下的模块组合优化问题. 与以往的优化配置方法相比, 本文所建立的模型和提出的方法具有以下优点.

(1) 基于 CA 处理顾客需求, 将顾客偏好量化表示为各产品特性质量效用的组合, 而以此引导的产品配置优化有利于获得顾客满意的配置方案.

(2) 在配置模型中考虑了多方面的约束, 使得模型更加贴近于实际应用, 应用遗传算法对该组合优化问题进行求解, 从而高效地获得了顾客满意的设计方案.

实例分析表明, 本文所建立的模型和提出的方法, 对于在按订单装配生产模式下获得顾客满意的产品配置方案是切实可行的.

参考文献:

- [1] Xie H, Henderson P, Kernahan M. Modeling and solving engineering product configuration problems by constraint satisfaction [J]. *International Journal of Production Research*, 2005, 43(10): 4455-4469.
- [2] Felfernig A, Fredrich G, Jannach D. Conceptual modeling for configuration of mass customizable products [J]. *Artificial Intelligent Engineering*, 2001, 15(1): 165-176.
- [3] Du Xuehong, Jiao Jianxin, Mitchell M T. Graph grammar based product family modeling [J]. *Concurrent Engineering: Research and Application*, 2002, 10(2): 113-128.
- [4] 王海军, 孙宝元, 张建明, 等. 客户需求驱动的模块化产品配置设计[J]. *机械工程学报*, 2005, 14(4): 85-91.
Wang Haijun, Sun Baoyuan, Zhang Jianming, et al. Modular product configuration design for customer requirements-driven engineering [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2005, 14(4): 95-91.
- [5] Zhang Jingsong, Wang Qifu, Wan Li, et al. Configuration oriented product modeling and knowledge management for made-to-order manufacturing enterprises [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2005, 25(1/2): 41-52.
- [6] Green P E, Krieger A M. Individualized hybrid models for conjoint analysis [J]. *Management Science*, 1996, 42(6): 850-867.

(编辑 管咏梅)