

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201712008



应用 Kano 模型的闭环产品 聚类配置方法

乔虎¹, 冯帆¹, 杜江¹, 李存良²

(1. 西安工业大学 机电工程学院, 陕西 西安 710021;
2. 轻工业西安机械设计研究院, 陕西 西安 710086)

摘要: 为解决产品配置过程中各零部件属性互为约束、无法分解的问题,引入闭环产品概念及其形式化表述.首先,以客户需求为基础,利用卡诺(Kano)模型快速拆解闭环产品约束,确定产品配置方向;然后,以设计结构矩阵(DSM)为工具,求解产品配置问题;最后,以民用无人机配置过程为例,验证该方法可完成闭环产品的配置,具有一定的可行性和有效性.

关键词: 产品配置;卡诺模型;设计结构矩阵;民用无人机

中图分类号: TP 391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2018)03-0349-06

Method of Closed-Loop Products Cluster Configuration Using Kano Model

QIAO Hu¹, FENG Fan¹, DU Jiang¹, LI Cunliang²

(1. School of Mechatronic Engineering, Xi'an Technology University, Xi'an 710021, China;
2. Light Industrial Xi'an Mechanic Design Research Institute, Xi'an 710086, China)

Abstract: In order to solve the problem that the co-constraints of the attributes among the parts are unable to decomposed in the process of product configuration, the concept of closed-loop product and its formal description were introduced. Firstly, the Kano model was used to decompose the co-constraints based on the demand of customers and confirm the direction of production configuration. Then, the problem of product configuration was solved by using the tool of the design structure matrix (DSM). Finally, the proposed method was used to finish the configuration of closed-loop product in process of configuration of civilian drone, which shows good feasibility and effectiveness.

Keywords: product configuration; Kano model; design structure matrix; civillian drone

为满足市场与企业产品快速迭代的需求,以模块化为基础的产品配置方法是缩短企业产品设计周期、提高客户满意度、降低生产成本的重要手段^[1-2].从产品配置思想^[3]的提出到现在,国内外学者已对产品配置的方法进行广泛的研究.目前,产品配置主要有基于规则和基于资源 2 类方法^[4-5],其配置过程是:首先,将客户的需求转化为产品的功能约束^[6];然后,根据约束,为每个功能模块选择唯一的实例,并将其组成配置系统;最后,完成产品配置方案.该方案利用不同模块满足客户的不同功能需求,可快速实现产品配置或设计重用,但该方法所面对的被配置本体大多为树状结构.例如,计算机主机的配置,其机

收稿日期: 2017-12-07

通信作者: 乔虎(1986-),男,讲师,博士,主要从事数字化设计制造及三维模型检索与重用方面的研究. E-mail: qiaon-wpu@hotmail.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51705392);西安工业大学校长基金资助项目(XAGDXJJ16004)

箱作为根节点,为其他功能模块提供支撑.其他功能模块作为具体功能实现单元,叶节点依附于其根节点之上.本文引入闭环产品的概念,通过卡诺(Kano)模型将闭环产品配置模型转换为常见的树状结构模型,并利用结构设计矩阵(DSM)聚类的方法对产品进行配置.

1 闭环产品

1.1 基本概念

客户对产品的选择从本质上说是对产品属性的选择^[7],产品的某一属性可由某一零部件直接决定,也可由多个零部件通过相互配合决定^[8].设产品的某一属性 A 需要由多个零部件 p_i 配合完成,其中,零部件 p_i 与零部件 p_j 之间存在约束关系,此约束关系可表示为 $p_i \rightarrow p_j$.

定义 1 若针对产品的某一属性 A ,需由 n 个零件 P 共同决定, $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n, n \in \mathbf{N}^+ \text{ 且 } n \geq 3\}$.产品中间的 l 个零部件之间的约束关系为 $p_i \rightarrow p_j, p_j \rightarrow p_k, \dots, p_l \rightarrow p_i, 3 \leq l \leq n$,称该产品为闭环产品.其中,由约束关系所组成的闭环称为约束环;位于约束环上节点位置的零部件称为环上零部件;不在约束环节点位置上,但与环上零部件存在约束关系的零部件称为环外零部件.

闭环产品典型结构,如图1所示.图1中:产品零件1~6为环上零部件;产品零件7~9为环外零部件.闭环产品具有产品属性、零件属性、开放性和唯一性4个特征.

1.2 形式化描述

根据闭环产品特征,采用5维的向量描述闭环产品,即

$$CLP = (ID, P, PDOM, C, M).$$

1) ID为闭环产品的标号.

2) P 为零部件的集合.它是对产品配置设计过程中零部件的归纳,零部件通过其标号、名称、类型等参数进行描述.根据零部件所处的位置节点,将零部件分为环上零部件和环外零部件,同一节点位置上的零部件可以是单个或多个.

3) PDOM为零部件的域集.域是闭环产品同一节点位置上可选零部件的范围,是具有相似属性的零部件集合.

4) C 为零部件之间的约束集.零部件的属性通过约束配合并最终表达为产品的属性.由定义1可知,在闭环产品的约束集中有明显的环状结构.

5) M 是零部件的方法集.产品的配置过程包括零部件的选型、配置方案的确定、生产加工及产品装配等步骤,其必须通过方法的集合加以表征.

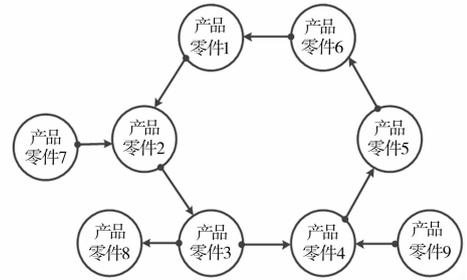


图1 闭环产品典型结构
Fig.1 Typical structure of closed-loop products

2 基于 Kano 模型的约束闭环拆解

2.1 Kano 模型

关于产品或服务是否满足顾客需求,Kano等^[9]提出Kano模型,它是通过双因数问卷调查表进行数据采集,以帮助企业了解不同层次的顾客需求对客户满意度的影响,从而得到其影响因素,并作为最终目的.量化的Kano模型可以标度用户对正向/负向问题的满意程度^[10-12].

2.2 闭环产品的拆解

由于闭环产品零部件的属性之间互相嵌套,必须先将某一零部件作为基本节点;然后,将此节点的零部件属性作为约束,代入下一个零部件的配置过程.产品配置的目的是为了满足客户的需求,但不同零部件在满足客户需求的求解过程中所占权重不尽相同.文中利用Kano模型计算闭环产品各零部件满足客户需求的权重,将所占最大权重的零部件作为闭环产品配置的基础节点.

Kano模型本质上属于定性分析方法,存在一定的模糊性与主观性,但对于闭环产品的拆解问题,Kano模型具有代入简单、计算速度快、使用方便等优点.因此,构建分析型Kano模型可进一步得到较

为准确的结果。

分析型 Kano 模型的构建需设计客户需求权重标度, 如表 1 所示. 表 1 中: ρ 为权重. 因零部件具有可替代性, 且最终配置方案必须满足客户需求, 故设计不对称的刻度.

表 1 分析型 Kano 模型正向/负向客户需求权重标度

Tab. 1 Weight scale of positive/negative demand of analytical Kano model

产品零部件	ρ (完全契合)	ρ (部分满足)	ρ (不影响)	ρ (可以补偿)	ρ (无法满足)
仅提供该零部件	0.50	0.25	0	-0.50	-1.00
不提供该零部件	-0.50	-0.25	0	0.50	1.00

若某闭环产品 CLP 的零部件集合 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, 针对闭环产品上的每一节点, 从其零件域 PDOM 中随机选取一个零部件构成分析域 D_a , 则每个零部件对客户的需求, 应满足的权重评价为

$$e_{i,j} = (x_{i,j}, y_{i,j}).$$

上式中: $x_{i,j}$ 为 D_a 中第 j 个零部件对客户需求的正向评价; $y_{i,j}$ 为 D_a 中第 j 个零部件对客户需求的负向评价.

用描点法将 $(x_{i,j}, y_{i,j})$ 在 2 维坐标图中标出. 其中, 横坐标为零部件对客户需求的满足水平, 纵坐标为零部件对客户需求的不满足水平. 满足客户需求的零部件 $(x_{i,j}, y_{i,j})$ 应落在第 1 象限中, 且横纵坐标均在 0~1 的范围内; 否则, 将其满足水平设置为 0, 表示该零部件对该产品是否满足客户需求无影响, 可在产品配置过程中不采用该零部件, 或依据其他约束条件对其进行配置. 对于落在第 1 象限中的零部件 $(x_{i,j}, y_{i,j})$, 计算距 $|e_{i,j}| = \sqrt{x_{i,j}^2 + y_{i,j}^2}$. 其中, $|e_{i,j}|$ 的数值越大, 说明该零部件在求解满足客户需求问题中的权重越大.

设某闭环产品共有 n 个环上零件, 第 n 个零部件的 $|e_{i,j}|$ 数值最大, 则将零部件 n 作为求解产品配置方案的起点, 沿约束指向方向进行产品配置问题的求解, 并利用指向零部件 n 的约束, 对求解进行反向验证, 最终将产品配置过程转化为树状求解过程, 如图 2 所示.

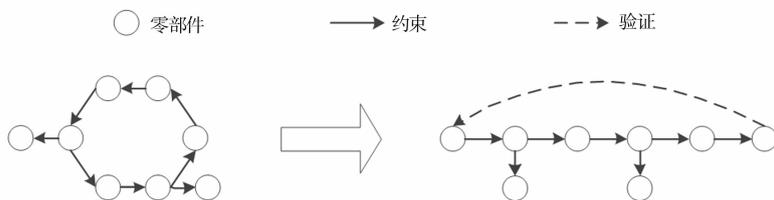


图 2 基于 Kano 模型的闭环产品配置求解问题转化

Fig. 2 Transformation of configuration of closed-loop products based on Kano model

3 面向约束的产品模块规划

产品各零部件之间存在几何约束或功能约束^[13], DSM 可用于描述不同零部件之间的约束关系, 利用 DSM 聚类算法, 形成若干满足约束关系的模块, 组成不同的产品配置方案, 再进行反向验证, 将验证成功的配置方案作为最终产品配置问题的解^[14-15].

利用 DSM 矩阵对产品装配问题进行规划的方法可分解为以下 3 个步骤.

步骤 1 建立 DSM. DSM 为一个 m 阶对称方阵, 方阵的行与列均表示产品包含所有零部件的不同待选型号. 若 r_i 与 c_j 满足约束关系, 则矩阵元素 $m_{i,j} = 1$; 否则, $m_{i,j} = 0$. $m_{i,j}$ 为产品零部件间约束关系的映射. 其主对角线元素均为 0, 最终建立的 DSM 矩阵为 $M = [m_{i,j}]$. 其中, $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, m$. DSM 的建立与聚类, 如图 3 所示. 图 3(a) 为一个根据 4 种类型共有 9 个零部件建立的 DSM.

步骤 2 DSM 的聚类. 采用文献[16-18]中提出的聚类算法对 DSM 进行聚类, 对 DSM 的聚类方法主要依靠矩阵的行列变换, 包括以下 4 个程序.

1) 独立元素的识别与分离. 检查 DSM 矩阵, 独立元素与其他行列元素没有任何联系, 其所在行与列内没有元素, 可将其移动至矩阵末尾处.

2) 行列变换. 对 DSM 矩阵执行行列变换, 使 DSM 中的非零单元格尽可能地靠近对角线位置.

3) 聚类划分. 选择下三角矩阵中高度最高的矩形空白区域, 以空白区域右上角定点为交叉点画直角坐标系, 将 DSM 划分为 4 个象限. 如果坐标系 y 轴右侧有被 x 轴截断的列, 则选择下三角矩阵中高度次之的矩形空白区域重新执行本程序; 如果 y 轴右侧区域不存在被 x 轴截断的列, 则将第 2 象限与第 4 象限中的区域划分为 2 个子类.

4) 针对第 4 象限中的子类, 循环执行程序 3), 直到 x 轴与矩阵下边界重合.

经过上述聚类算法, 可得到对角化的 DSM 聚类矩阵, 如图 3(b) 所示.

步骤 3 DSM 的解读. 产品配置问题的解 M_i 存在于 DSM 聚类后所生成的子模块中. 以聚类矩阵 M_C 为例, 它的 2 个子模块分别包含 $d1 \rightarrow c2 \rightarrow b1 \rightarrow a1$ 和 $a3 \rightarrow b2 \rightarrow c1 \rightarrow d2$ 这 2 个可能的解.

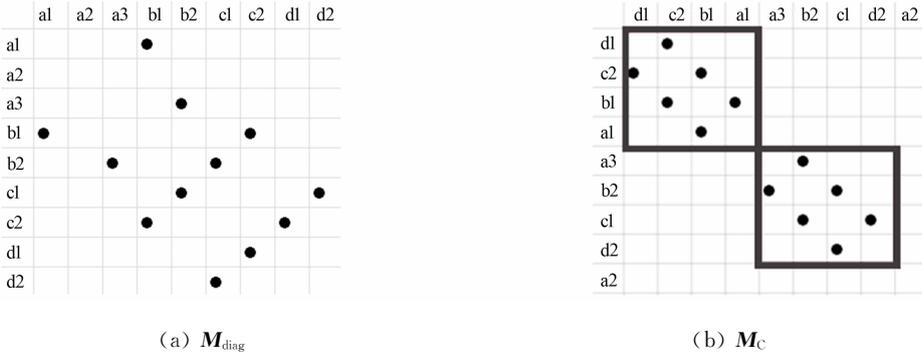


图 3 DSM 的建立与聚类

Fig. 3 Building and clustering of DSM

4 实例分析

民用无人机一般由机架、电机、电调、桨叶、飞控、全球定位系统、遥控器、电池等主要部件组成, 功能模块包括云台、摄像机、水箱等, 附加配件包括脚架、桨叶保护罩等, 连接紧固件包括螺钉、连接线、插头等. 民用无人机核心零部件之间的约束关系, 如图 4 所示. 由图 4 可知: 民用无人机属于闭环产品.

某用户需要配置一架 4 轴无人机, 通过市场调研得到常见无人机的配置零部件种类, 并由 Kano 模型计算出各零部件的权重指数 ρ , 如表 2 所示.

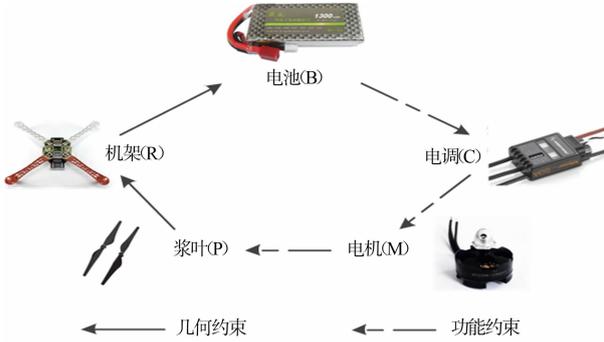


图 4 民用无人机核心零部件之间的约束

Fig. 4 Constraint among core parts of civilian drones

表 2 无人机各零部件权重指数

Tab. 2 Weight scale of drones parts

零部件名称	ρ (正向评价标度)	ρ (负向评价标度)	ρ
轴机架	0.5	1.0	1.5
6 轴机架	-1.0	-0.5	-1.5
锂电池	0	0.5	0.5
普通电机	-1.0	0	-1.0
无刷电机	0	0.5	0.5
桨叶	0	0.5	0.5

由表 2 可知: 该无人机配置问题排斥 6 轴机架及普通电机; 其余零部件中, 4 轴机架权重指数最高. 因此, 在配置问题求解过程中, 应以 4 轴机架作为起点, 沿约束方向, 即机架(R) \rightarrow 电池(B) \rightarrow 电调(C) \rightarrow 电机(M) \rightarrow 桨叶(P) 方向进行配置, 而桨叶对机架的约束则被转换为反向验证约束, 用于确定配置方案的合理性.

以市场上各种类零部件的常见型号与约束关系建立 DSM 矩阵, 如图 5 所示. 通过产品聚类方法对矩阵 M_P 进行聚类, 得到产品配置模块聚类矩阵 M_C , 如图 6 所示.

以 3 种不同的机架为起点, 对聚类矩阵 M_C 进行解读, 依据 3 个不同的聚类子块得到 4 条约束路径规划, 如图 7 所示.

根据路径规划得到的 4 种产品配置方案, 如表 3 所示. 表 3 中: I 为电流; U 为电压. 由于机架与桨

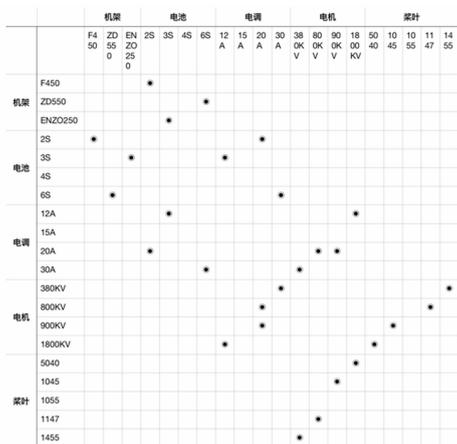


图 5 产品 DSM- M_p

Fig. 5 DSM of products- M_p

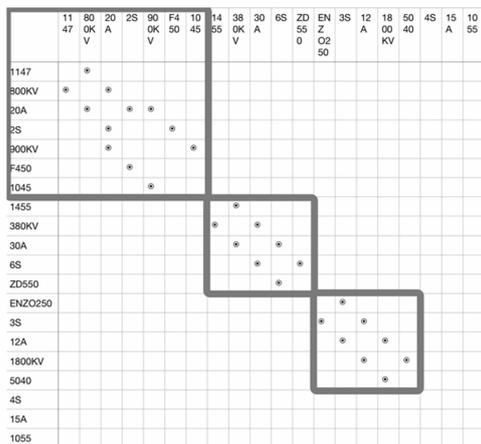


图 6 产品配置聚类矩阵- M_c

Fig. 6 Clustered matrix of product configuration- M_c

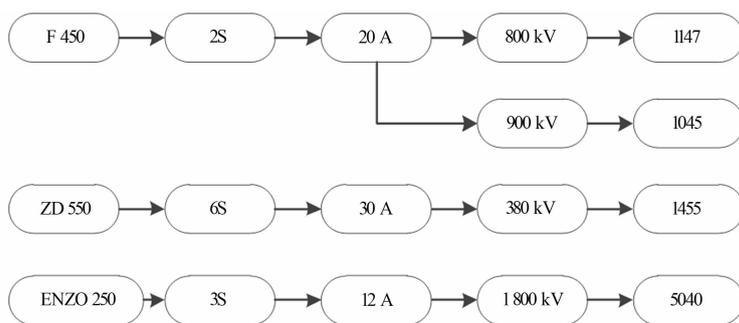


图 7 零件约束路径规划

Fig. 7 Constraint trail among parts

叶之间存在几何约束,即机架两相邻悬臂之间的距离不能小于桨叶长度,通过对这 4 种配置方案进行反向验证,得到各配置方案均可满足机架与桨叶之间的几何约束要求。

表 3 产品配置方案

Tab. 3 Projects of product configuration

配置方案	机架型号	电池型号	I(电调)/A	U(电机)/kV	桨叶型号
1	F 450	2S	20	800	1147
2	F 450	2S	20	900	1045
3	ZD 550	3S	12	1 800	5040
4	ENZO 250	6S	30	380	1455

5 结束语

由于客户需求的多样化与产品种类的急剧增多,导致产品配置的复杂度与成本急速增加.因此,提出基于 Kano 模型的闭环产品配置方法,对产品进行有效、快速地配置.利用 Kano 模型解决闭环产品配置过程中,不同零部件配置优先级的问题,对待选零部件进行初步筛选.采用 DSM 聚类对产品进行详细配置,可快速确定产品配置方案。

参考文献:

[1] QIU Lemiao, LIU Xiaojian, ZHANG Shuyou, et al. Disassemblability modeling technology of configurable product based on disassembly constraint relation weighted design structure matrix (DSM)[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2014, 27(3): 511-519. DOI: 10. 3901/CJME. 2014. 03. 511.

[2] 盛步云, 汪星刚, 萧箏, 等. 基于客户需求分析的模块化产品配置方法[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(10): 2091-2100. DOI: 10. 13196/j. cims. 2017. 10. 002.

- [3] LAN R, RONALD S M. Mass customization: The next industrial revolution[J]. *Industrial Management*, 1995, 37(5): 18-19.
- [4] 王世伟, 谭建荣, 张树有, 等. 基于 GBOM 的产品配置研究[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2004, 16(5): 655-659. DOI: 10. 3321/j. issn: 1003-9775. 2004. 05. 010.
- [5] 包志炎, 计时鸣, 阮曙峰. 基于蜂群进化机制的产品配置技术研究[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(1): 328-334. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2014. 01. 050.
- [6] 乔虎, 莫蓉, 向颖, 等. 一种自创生产品配置模型构建方法[J]. *计算机集成制造系统*, 2015, 21(9): 2277-2286. DOI: 10. 13196/j. cims. 2015. 09. 003.
- [7] 任彬, 张树有, 伊国栋. 基于模糊多属性决策的复杂产品配置方法[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(19): 108-116. DOI: 10. 3901/JME. 2010. 19. 108.
- [8] 张萌, 李国喜, 龚京忠, 等. 基于三维模型的产品模块化配置方法[J]. *计算机集成制造系统*, 2012, 18(11): 2370-2380. DOI: 10. 13196/j. cims. 2012. 11. 18. zhangm. 020.
- [9] KANO N, SERAKU N, TAKAHASHI F, *et al.* Attractive quality and must be quality[J]. *Journal of the Japanese Society for Quality Control*, 1984, 4(2): 147-156. DOI: 10. 20684/quality. 14. 2_147.
- [10] 孟庆良, 邹农基, 李晓萍, 等. 基于分析型 KANO 模型的物流服务质量提升决策方法[J]. *运筹与管理*, 2012, 21(2): 64-73. DOI: 10. 3969/j. issn. 1007-3221. 2012. 02. 011.
- [11] BERGER C. Kano's methods for understanding customer-defined quality[J]. *Center for Quality Management Journal*, 1993, 2(4): 3-36.
- [12] XU Qianli, JIAO R J, YANG Xi, *et al.* An analytical Kano model for customer need analysis[J]. *Design Studies*, 2009, 30(1): 87-110. DOI: 10. 1016/j. destud. 2008. 07. 001.
- [13] 邵伟平, 刘永贤, 郝永平, 等. 基于分布式约束满足的产品配置研究[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2007, 28(1): 103-106. DOI: 10. 3321/j. issn: 1005-3026. 2007. 01. 026.
- [14] LI S. A matrix-based clustering approach for the decomposition of design problems[J]. *Research in Engineering Design*, 2011, 22(4): 263-278. DOI: 10. 1007/s00163-011-0111-z.
- [15] LI S, MIRHOSSEINI M. A matrix-based modularization approach for supporting secure collaboration in parametric design[J]. *Computers in Industry*, 2012, 63(6): 619-631. DOI: 10. 1016/j. compind. 2012. 04. 003.
- [16] BROWNING T R. Applying the design structure matrix to system decomposition and integration problems: A review and new directions[J]. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 2001, 48(3): 292-306. DOI: 10. 1109/17. 946528.
- [17] 何睿, 唐敦兵, 薛建彬. 基于设计结构矩阵的工程变更传播研究[J]. *计算机集成制造系统*, 2008, 14(4): 656-660. DOI: 10. 13196/j. cims. 2008. 04. 34. her. 001.
- [18] 刘建刚, 唐敦兵, 杨春, 等. 基于物理 DSM 与行列变换的产品结构聚类划分[J]. *系统工程与电子技术*, 2008, 30(10): 1904-1908. DOI: 10. 3321/j. issn: 1001-506X. 2008. 10. 022.

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 崔长彩)