

一种面向大批量定制的产品可拓设计方法

马 辉 谭建荣 张树有 冯毅雄

浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室, 杭州, 310027

摘要: 分析了大批量定制模式下产品设计的研究现状, 提出了面向大批量定制的产品可拓设计思想。运用物元理论对大批量定制产品模型进行了重构, 建立了面向整个设计过程的统一物元模型, 并通过物元变换与拓展实现产品变型设计, 最后对产品进行了优度评价。实例分析证明, 可拓设计不仅满足大批量定制产品的多样化需求, 还大大提高了设计过程的规范化和可重用性。

关键词: 大批量定制; 物元模型; 可拓设计; 优度评价

中图分类号: TP391.72 TH122

文章编号: 1004-132X(2005)15-1344-06

Extense Design Method of Products in Domain of Mass Customization

Ma Hui Tan Jianrong Zhang Shuyou Feng Yixiong

State Key Laboratory of CAD&CG, Zhejiang University, Hangzhou 310027

Abstract The status of research on design for Mass Customization were analyzed. With an eye to the advantage of matter-element, a new model of MC products was established. And this new model included all design processes of MC products. Using the extensibility of matter-element, design processes of MC products were developed and the normativeness and reusability of MC product design were enhanced. Another important advantage of affair-matter-element was that it can support merit rating. After merit rating, the final products were proposed to different customers. An example of electrostatic precipitator, a classic mass customization product with huge body and complex conformation, is given to illustrate relevant enable technologies for the methods mentioned.

Key words mass customization (MC); matter-element model; extense design; merit rating

0 引言

Tseng 等^[1]在 1996 年首先提出了大批量定制设计 (design for mass customization, DFMC) 的概念, 并将产品族结构 (product family architecture

PFA) 作为 DFMC 的核心。文献 [2~7] 围绕 DFMC 技术展开了大量的研究, 提出了产品族建模的三视图方案 (即功能视图、技术视图和结构视图), 阐述了各个视图的模型描述, 分析了产品族建模的图形规则方法, 建立了与产品族关联的通用产品结构, 并将这些方法与技术运用到大批量定制 (mass customization MC) 产品的设计过程中。

Dahmus 等^[8]通过建立功能结构与模块之间的映射, 对比功能的客户需求程度并划分层次, 进而

收稿日期: 2004-09-08

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (2003AA413310, 2003AA411320); 浙江省青年科技人才培养基金资助项目 (R603240)

- [21] Yang C Q, Cheng M C. Developing a PDM/ERP Integration Framework to Evaluate the Influence of Engineering Change on Inventory Scrap Cost. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2003, 22: 161~174
- [22] 朱海平, 王忠浩, 李培根. 基于 PDM 的工程变更管理研究. 计算机集成制造系统 - CIMS, 2003, 9(7): 537~541
- [23] 杨煜俊, 刘清华, 万立, 等. 基于产品结构的工程变更研究. 中国机械工程, 2004, 15(12): 1055~1059
- [24] 刘士军, 孟祥旭, 龚斌. 支持工程变更的柔性工作流程系统建模与实现. 计算机集成制造系统 - CIMS, 2003, 9(S1): 79~84
- [25] Liu S J, Meng X X, Zhong S W, et al. Research on

Engineering Change Management in Virtual Enterprise. The 4th World Congress on Intelligent Control and Automation, Shanghai, 2002

- [26] 朱全敏, 熊光楞, 辜承林. 并行工程中工程更改的管理及应用实例. 计算机工程与应用, 2002(12): 221~223

(编辑 晓舟)

作者简介: 刘晓冰, 男, 1956 年生。大连理工大学 CMS 中心教授、博士研究生导师。主要研究方向为先进制造模式、CAD/CAM/CMS 等。出版专著 2 部, 发表论文 80 余篇。孟永胜, 男, 1975 年生。大连理工大学 CMS 中心博士研究生。邢英杰, 男, 1961 年生。大连理工大学 CMS 中心副教授。薛冬娟, 女, 1971 年生。大连理工大学 CMS 中心博士研究生。

完成产品体系的设计; Srinivas等^[9]采用系统的方法识别与提取产品族中的设计基因单元, 来满足多样化的设计要求; 夏国平等^[10]逐层分解了产品 BOM 和工序集, 建立了面向大批量定制的产品设计模型; 肖刚等^[11]以电梯轿厢为例分析了机电产品 DEMC 中的关键技术。

现有的设计方法仍然存在局限性, 主要表现在如下方面: ①关注设计过程中局部重构和创新, 缺少对 MC 产品整个设计过程的重新规划和模型建立; ②由于受产品描述模型的局限, 对于增加产品变型设计能力缺少有效的方法; ③对于得到的产品设计结果, 并没有进行有效的优度评价。

因此, DEMC 需要建立统一的产品模型, 并在统一模型的基础上能够提供支持产品变型设计的有效方法。物元理论^[12]与可拓学^[13]为 MC 产品设计过程提供了有效的方法与途径。物元理论与可拓学提供了有效的建模理论与方法, 可以对不同形态的模型进行统一的描述, 同时, 运用物元方法还可以利用其可拓性进行模型的拓展和变化。本文从 MC 产品的物元分析入手, 提出了 MC 产品可拓设计的方法, 建立了贯穿整个产品可拓设计过程的物元模型, 并结合实例进行了分析。

1 MC 模式下的产品物元描述

可拓学以物元作为认识和分析事物的基本逻辑单元。给定事物的名称 N , 它关于特征 c 的量值为 v 以有序三元组 $R = (N, c, v)$ 作为描述事物的基本元, 简称物元。一个事物有多个特征, 如果事物以 n 个特征 c_1, c_2, \dots, c_n 和相应的量值 v_1, v_2, \dots, v_n 来描述, 则表示为^[12]

$$R = \begin{bmatrix} N & c_1 & v_1 \\ & c_2 & v_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_n \end{bmatrix}$$

这时, 称 R 为 n 维物元, 简记为 $R = (N, C, V)$ 。面向 MC 的产品设计过程必须考虑从需求到生产的整个过程即产品生命周期 (product life cycle, PLC), 我们通过统一的物元形式建立面向 PLC 的产品模型。

1.1 产品期望物元

客户对于产品的需求会表现为共性需求与个性需求两方面。面向客户的产品期望物元也包括共性需求和个性需求两个方面, 分别以共性需求物元 R_{co} 和个性需求物元 R_{in} 表示。产品期望物元可记作 $R_{exp} = R_{co} \times R_{in}$ 。

1.2 产品族物元

实现 MC 产品多样化的一个重要途径就是建

立产品族。产品族模型可以用结构视图、功能视图和原理视图三个彼此相关的视图组成^[2]。与此相对应, 产品族物元描述也由结构物元、功能物元和原理物元构成。

(1) 产品族结构物元 产品族结构不仅要表示组成产品族的各个零部件实体, 而且还要表示这些实体之间的相互关系。这里将产品族组成部分 m_1, m_2, \dots, m_n 的全集称为产品族的硬部, 记作 $R_{hr} = (m_1, m_2, \dots, m_n)$; 同时, 产品族的组成部分 m_1, m_2, \dots, m_n 之间以及与外部有种种联系, 将这种联系的全体称为产品族的软部, 记作 R_{sf} 。产品族结构物元可记作 $R_{str} = R_{hr} \times R_{sf}$ 。

(2) 产品族功能物元 产品族功能具有动态性, 既有显化的, 也有潜在的。将产品族在既定结构及其关系下表现为显化的功能称为产品族的显部, 以 R_{ap} 表示; 将产品族可以通过既定结构及其关系进行可拓变化而得到的潜在功能称为产品族的潜部, 以 R_{li} 表示。产品族功能物元可记作 $R_{fun} = R_{ap} \times R_{li}$ 。

(3) 产品族原理物元 产品族的原理视图是描述为获得结构而使用的解原理 (或方案), 以及体现该解原理 (或方案) 的各种设计约束、分析计算关系和对设计过程的控制等。

给定结构的产品族 $R = R_{str} = R_{hr} \times R_{sf}$ 且 $q \in \{R_{hr}\} \cup \{R_{sf}\}$, 当 $c(q) \geq 0$ 时, 称 q 为 R 关于功能 c 的正部分, 记为 q^+ ; 当 $c(q) \leq 0$ 时, 称 q 为 R 关于功能 c 的负部分, 记为 q^- 。 R 中关于功能 c 的一切正部分 (正向作用) 的全体称为 R 的正部, 记作 $R_{ps(c)} = \sum q^+$; R 中关于功能 c 的一切负部分 (负向作用) 的全体称为 R 的负部, 记作 $R_{ng(c)} = \sum q^-$ 。产品族原理物元可记作 $R_{lec} = R_{ps(c)} \times R_{ng(c)}$ 。

1.3 产品存在物元

通过大批量定制设计, 可以得到进行 MC 模式生产的产品模型, 这里以产品存在物元 R_{ex} 来表示。产品存在物元包括生产结构物元、生产工艺物元、装配物元、成本物元等子物元。

$$R_{ex} = \begin{bmatrix} N_{ex} & c_{ex1} & v_{ex1} \\ & c_{ex2} & v_{ex2} \\ & \dots & \dots \end{bmatrix} = \begin{cases} R_{ex1} = \begin{bmatrix} N_{ex1} & c_{ex11} & v_{ex11} \\ & \dots & \dots \end{bmatrix} \\ R_{ex2} = \begin{bmatrix} N_{ex2} & c_{ex21} & v_{ex21} \\ & \dots & \dots \end{bmatrix} \\ \dots \end{cases}$$

1.4 产品实现物元

产品实现物元 R_{ac} 是指在产品存在物元集合的基础上, 进行优度评价等方式得到的最终产品的物元模型, 它与产品存在物元拥有同样的物元结

构。

通过以上对 MC 产品面向不同对象的物元分析, 可以建立 MC 产品物元描述的概念模型, 如图 1 所示。通过物元方法对整个 MC 设计过程的产品模型重构, 使整个产品模型涵盖了从需求到生产的各个过程, 并且结合了产品族的三个视图。整个模型都运用物元的形式, 使模型各个阶段的联结紧密, 并且为模型之间的相互转化与拓展奠定的基础。

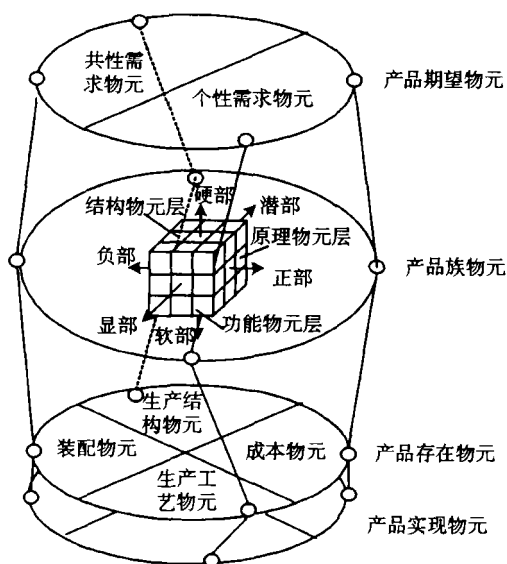


图 1 MC 产品物元描述概念模型

2 MC 产品可拓设计过程

通过 MC 产品物元模型的建立, 完成了面向设计过程中各个层面的产品模型的统一描述。进行 MC 产品设计时, 可以先充分运用物元的可拓性进行产品的变型与拓展(发散过程), 然后通过对可拓集合的定量化来完成产品的优度评价(收敛过程)。其主要过程如下:

(1) 分析客户需求信息, 建立产品期望物元 R_{exp} 。产品期望物元由共性需求物元 R_{co} 与个性需求物元 R_{in} 组成。

$$R_{\text{exp}} = \begin{bmatrix} N_{\text{exp}} & c_{\text{exp1}} & v_{\text{exp1}} \\ & c_{\text{exp2}} & v_{\text{exp2}} \\ & \dots & \dots \end{bmatrix} = \begin{cases} R_{\text{co}} = \begin{bmatrix} N_{\text{co}} & c_{\text{co1}} & v_{\text{co1}} \\ & c_{\text{co2}} & v_{\text{co2}} \\ & \dots & \dots \end{bmatrix} \\ R_{\text{in}} = \begin{bmatrix} N_{\text{in}} & c_{\text{in1}} & v_{\text{in1}} \\ & c_{\text{in2}} & v_{\text{in2}} \\ & \dots & \dots \end{bmatrix} \end{cases}$$

(2) 通过物元变换以及约束规则将产品期望物元中共性需求的特征与量值转换为产品族物元模型不同视图中的特征与量值。从映射规则库中提取相应的映射关系, 来完成从共性需求到功能—结构—原理三视图的物元变换。

$$TR_{\text{co}} = R = (N \ C \ V) = \begin{cases} R_{\text{ap}} = \begin{bmatrix} N_{\text{ap}} & c_{\text{ap1}} & v_{\text{ap1}} \\ & c_{\text{ap2}} & v_{\text{ap2}} \\ & \dots & \dots \\ & c_{\text{apm}} & v_{\text{apm}} \end{bmatrix} \\ R_{\text{lt}} = \begin{bmatrix} N_{\text{lt}} & c_{\text{lt1}} & v_{\text{lt1}} \\ & c_{\text{lt2}} & v_{\text{lt2}} \\ & \dots & \dots \\ & c_{\text{ltm}} & v_{\text{ltm}} \end{bmatrix} \\ R_{\text{hr}} = \dots \\ R_{\text{sf}} = \dots \\ R_{\text{ps(c)}} = \dots \\ R_{\text{ng(c)}} = \dots \end{cases}$$

式中, T 为变换因子。

(3) 利用物元的发散性, 从产品族物元各子物元的三要素中的一个或两个出发进行发散, 可得到多个物元, 如图 2 所示, 图中, $i = 1, 2, \dots, n$ 。

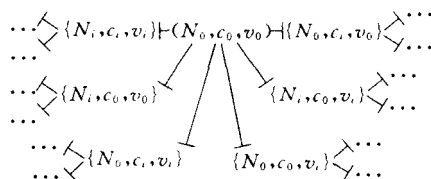


图 2 物元的发散与拓展过程

利用物元的可扩性, 可以对产品族包含的各个子物元以及通过发散所得到的子物元进行分解与重构; 产品族物元的共轭性与相关性反映了其各子物元之间的约束关系与变换规则; 确保一个物元进行变换时, 有约束关系的物元可以依据规则进行相应的变换。

通过上述可拓变换, 可以得到满足 $(C \ V)$ 的产品存在物元 R_{ex}

$$R_{\text{ex}} = \begin{cases} R_{\text{ex1}} = \begin{bmatrix} N_{\text{ex1}} & c_{\text{ex11}} & v_{\text{ex11}} \\ & \dots & \dots \end{bmatrix} \\ R_{\text{ex2}} = \begin{bmatrix} N_{\text{ex2}} & c_{\text{ex21}} & v_{\text{ex21}} \\ & \dots & \dots \end{bmatrix} \\ \vdots \end{cases}$$

(4) 进行优度评价, 即从已有的产品存在物元中通过优劣的比较挑选出最适宜某一客户需求的产物元, 并将它作为针对该客户的产品实现物元。

① 确定衡量条件 根据不同客户提出的个性需求, 确定衡量条件集 $M = \{M_1, M_2, \dots, M_n\}$, 其中 $M_i = (d_i, V_i)$, d_i 为衡量条件特征元, V_i 为数量化的量值域。

② 确定权系数 评价产品是否满足某一客户要求的衡量条件 $M = \{M_1, M_2, \dots, M_n\}$, 以权系数来表示各个衡量条件的重要程度, 根据重要程度分别赋予 $[0 \ 1]$ 之间的值, 权系数 $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$ 。

..., α_n), 且满足 $\sum_{k=1}^n \alpha_k = 1$.

③ 建立关联函数, 计算合格度 关联函数引入经典数学中点与区间的间距 ρ 的概念, 设 x 为任意点, 区间 $X_{0i} \subset$ 区间 X_s , 关于 V_i 的关联函数为

$$K_j(x) = \begin{cases} \frac{\rho(x, X_{0i})}{|X_{0i}|} & V_i \text{ 用区间 } X_{0i} \text{ 表示} \\ \frac{\rho(x, X_{0i})}{\rho(x, X_{0i}) - \rho(x, X_{0i})} & V_i \text{ 用区间套 } X_{0i}, X_{0i} \text{ 表示} \end{cases}$$

把 R_i 关于 V_i 的关联函数值简记为 $K_i(R_j)$, 则 R 关于 M_i 的合格度为

$$k_i = (K_i(R_1), K_i(R_2), \dots, K_i(R_m)) \quad i = 1, 2, \dots, n$$

规范合格度为

$$k_{ij} = \begin{cases} k_i = (k_{i1}, k_{i2}, \dots, k_{in}) \\ \frac{K_i(R_j)}{\max_{x \in X_0} K_i(x)} & K_i(R_j) > 0 \\ \frac{K_i(R_j)}{\max_{x \in X_0} |K_i(x)|} & K_i(R_j) < 0 \end{cases}$$

④ 计算优度 产品存在物元的优度为

$$C(R_j) = \alpha K(R_j) = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) \begin{bmatrix} k_{1j} \\ k_{2j} \\ \vdots \\ k_{nj} \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^n \alpha_i k_{ij} \quad j = 1, 2, \dots, m$$

通过对产品存在物元的优度分析, 可以得到适合不同客户的产品实现物元, 完成设计。整个面向 MC 产品可拓设计的过程如图 3 所示。

3 实例分析

电除尘器的阴极系统客户定制程度高、模块性强, 属于典型的适宜 MC 生产的产品。现以电除尘器阴极系统为例, 进一步阐述面向 MC 的产品可拓设计方法。

(1) 建立电除尘器阴极系统产品期望物元

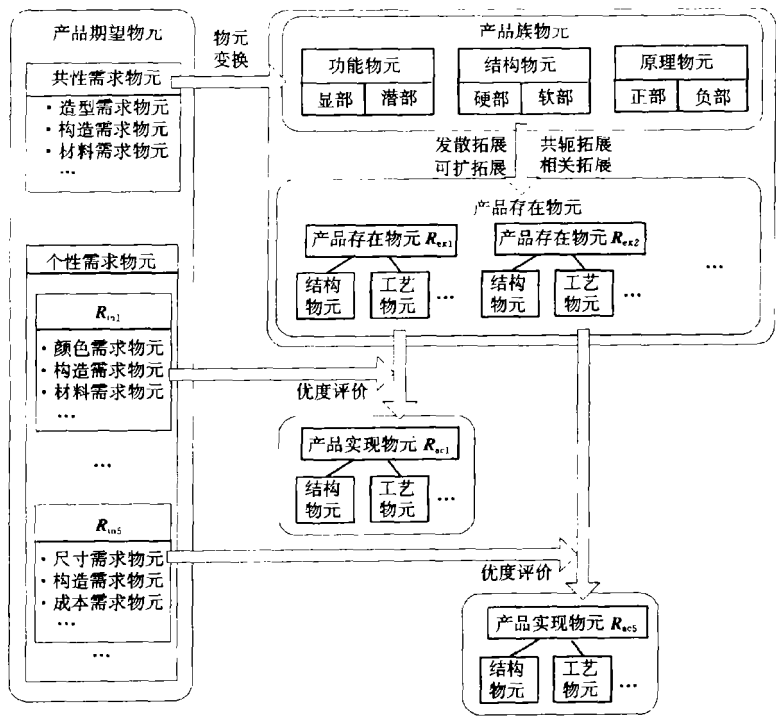


图 3 MC 产品可拓设计过程

$$R_{ex} = \begin{bmatrix} \text{电场尺寸} & \text{长度 } 8 \sim 12\text{m} \\ & \text{宽度 } 4 \sim 8\text{m} \\ & \text{高度 } 5 \sim 10\text{m} \\ \text{阴极线} & \text{线型 RSB 线} \\ & \text{材质 高镍不锈钢} \\ & \text{线间距 } 500\text{mm} \\ \text{阴极振打} & \text{方式 机械振打} \\ & \text{最小加速度 } 50\text{g} \\ \dots & \dots \end{bmatrix}$$
$$R_m = \begin{bmatrix} N_{in1} & \text{竖梁} & \text{二线型} \\ & \text{除尘效率 } \geq 99.2\% \\ & \dots \\ \dots & \dots & \dots \\ R_{in6} & \text{均流装置} & \text{配备} \\ & \text{振打电机} & \text{全电压启动} \\ \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}$$

(2) 通过物元变换, 形成电除尘器阴极系统产品族物元

$$R = TR_{co} = \left[\begin{array}{l} \left[\begin{array}{l} N_{hr} \text{ 名称 阴极系统} \\ \text{节点 一级部件} \end{array} \right] \\ \left[\begin{array}{l} m_1 \text{ 名称 阴极线} \\ \text{节点 二级部件} \end{array} \right] \left[\begin{array}{l} m_2 \text{ 名称 悬挂系统} \\ \text{节点 二级部件} \end{array} \right] \dots \\ \left[\begin{array}{l} m_{11} \text{ 名称 LX-800} \\ \text{节点 选用部件} \end{array} \right] \left[\begin{array}{l} m_{12} \text{ 名称 LX-900} \\ \text{节点 选用部件} \end{array} \right] \left[\begin{array}{l} m_{21} \text{ 名称 上部框架} \\ \text{节点 三级部件} \end{array} \right] \dots \\ \dots \end{array} \right]$$

$$\left[\begin{array}{l} N_{sf} \text{ } m_1 \text{ (阴极线)} \rightarrow m_{21} \text{ (上部框架)} \text{ 悬挂} \\ \text{ } m_1 \text{ (阴极线)} \rightarrow m_{22} \text{ (中部框架)} \text{ 固定} \\ \text{ } m_3 \text{ (竖梁)} \rightarrow m_{21} \text{ (上部框架)} \text{ 支撑} \\ \dots \end{array} \right]$$

$$\left[\begin{array}{l} N_{ap} \text{ 电除尘器类型 } F \text{ 型} \\ \text{电场名义高度 } 500 \sim 1000\text{cm} \\ \text{电场名义宽度 } 400 \sim 800\text{cm} \\ \dots \end{array} \right]$$

$$\left[\begin{array}{l} N_{lt} \text{ 支撑形式 } \text{无轴承支撑} \\ \text{电场名义高度 } 500 \sim 1500\text{cm} \\ \text{电场名义宽度 } 400 \sim 1200\text{cm} \end{array} \right]$$

$$\left[\begin{array}{l} N_{ps(c)} \left[\begin{array}{l} n_1^+ \text{ 名称 阴极线 LX-800} \\ \text{满足需求 电场名义高度 } 800\text{cm} \\ \text{选用线型 二线型} \end{array} \right] \\ \dots \end{array} \right]$$

$$\left[\begin{array}{l} N_{ng(c)} \left[\begin{array}{l} n_1^- \text{ 名称 阴极线 LX-800} \\ \text{设计约束 重量参数 } 0.023 \end{array} \right] \\ \dots \end{array} \right]$$

(3) 利用物元的可拓性, 得到电除尘器阴极系统产品存在物元, 如图 4 所示。

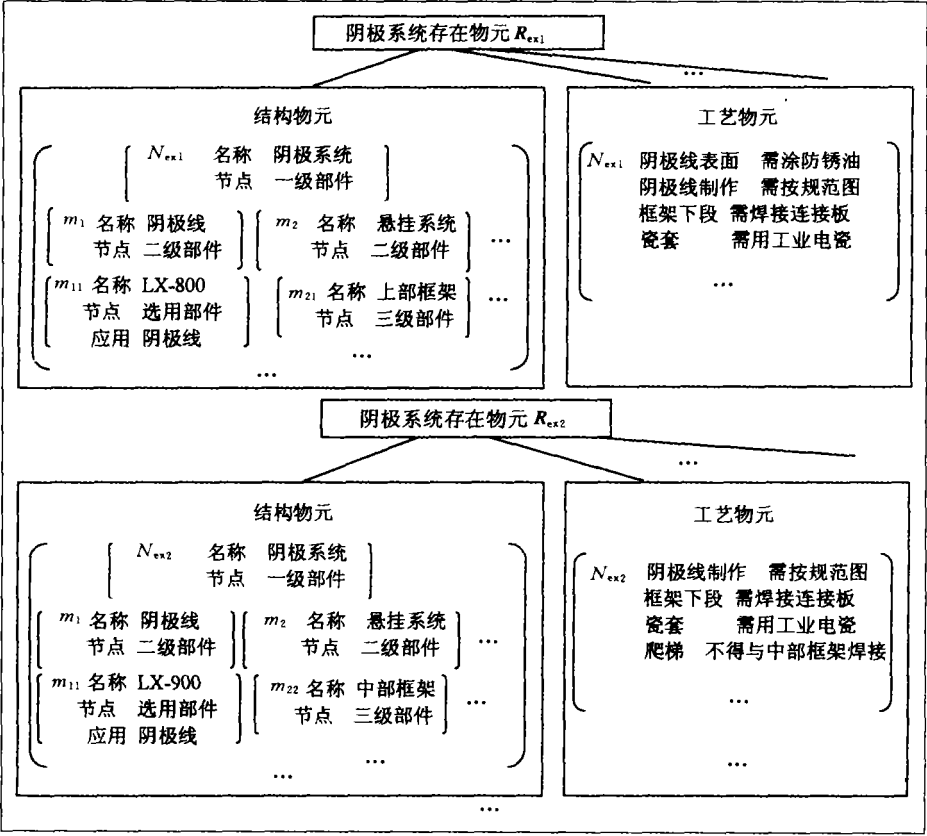


图 4 阴极系统存在物元集合

(4)根据某一客户要求,设定衡量条件与权系数。设衡量条件集为 $V = (V_1, V_2, V_3, V_4)$, 其中, V_1 为除尘效率, 99.5% ~ 99.8% 为最佳, 99.3% ~ 99.5% 为可用, 99.3% 以下不满足要求; V_2 为阴极线质量, A 级为最佳, B 级可用, B 级以下不满足要求; V_3 为悬挂系统, 总重量不超过 5t; V_4 为支撑系统, 无轴承支撑最佳, 可用轴承支撑形式。由于 V_3 属于为必须满足条件, 可以直接进行判断。通过多方面的考虑, 建立其他三个衡量条件的权系数为 $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3) = (0.2021, 0.7007, 0.0992)$ 。

(5)根据衡量条件集,可以得到关联函数。将每一阴极系统存在物元中针对 V 的数值代入关联函数中,即可得到合格度。对各个合格度进行规范后,即可计算优度,阴极系统存在物元中优度最高的为该客户的最终阴极系统实现物元。

4 结论

(1)分析了大批量定制设计技术的研究现状,提出了将物元理论与可拓学运用到大批量定制设计中的新思路。

(2)通过对于大批量定制生产模式的物元分析,建立了面向整个设计过程的大批量定制产品物元模型,使各个阶段的产品模型具有统一的描述方法。

(3)提出了大批量定制产品可拓设计方法,将可拓学思想运用到产品设计过程中,增强了设计过程的可拓展性与重用性。通过电除尘器阴极系统实例阐述了可拓设计的过程,最后还对可拓设计得到的产品结果进行了优度评价。

将物元理论引入到解决大批量定制问题还有一定的局限性,如何通过运用物元方法促进大批量定制过程的时效性、增强大批量定制设计过程的重用性等,都值得进一步研究。

参考文献:

[1] Tseng M M, Jiao J Design for Mass Customization. Annals of the CIRP, 1996, 45(1): 153 ~ 156
[2] Jiao J, Tseng M M. Product Family Modeling for Mass Customization. Computers Industry Engineering

1998, 35(3-4): 495 ~ 498
[3] Jiao J, Tseng M M. A Methodology of Developing Product Family Architecture for Mass Customization. Journal of Intelligent Manufacturing, 1999, 10(1): 3 ~ 20
[4] Jiao J, Tseng M M. Fundamentals of Product Family Architecture. Integrated Manufacturing Systems, 2000, 11(7): 469 ~ 483
[5] Du X, Jiao J, Tseng M M. Product Family Modeling and Design Support: an Approach Based on Graph Rewriting Systems. Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing (AIE-DAM), 2002, 16(2): 103 ~ 120
[6] Du X, Jiao J, Tseng M M. Product Platform Representation: a Graph Grammar Approach. CIRP Journal of Manufacturing Systems, 2001, 31(2): 1 ~ 7
[7] Du X, Jiao J, Tseng M M. Graph Grammar Based Product Family Modeling. Concurrent Engineering Research and Application, 2002, 10(2): 113 ~ 128
[8] Dahmus J B, Javier P G, Kevin N O. Modular Product Architecture. Design Studies, 2001(22): 409 ~ 424
[9] Srinivas N, Gunther M, Harsh K. A Systematic Method for Designing Profitable Product Families. The ASME Design Engineering Technical Conference, Chicago, 2003
[10] 夏国平, 肖依永. 面向大规模定制的产品设计的一种模型. 航空学报, 2000, 23(5): 491 ~ 494
[11] 肖刚, 方志民, 单继宏, 等. 机电产品大规模定制设计模式研究. 中国机械工程, 2002, 13(18): 1548 ~ 1550
[12] 蔡文. 物元模型及其应用. 北京: 科学技术文献出版社, 1994
[13] 蔡文, 杨春燕, 林伟初. 可拓工程方法. 北京: 科学出版社, 1997

(编辑 苏卫国)

作者简介: 马 辉, 男, 1977年生。浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室博士研究生。主要研究方向为大批量定制技术、CMS、产品信息建模等。谭建荣, 男, 1954年生。浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室副主任、教授、博士研究生导师。张树有, 男, 1963年生。浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室教授、博士研究生导师。冯毅雄, 男, 1975年生。浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室博士后研究人员。