

DOI:10.13196/j.cims.2015.03.001

基于优先数系的产品族型谱规划模型

高 飞,梅凯城,张元鸣,卢书芳,肖 刚

(浙江工业大学 计算机学院,浙江 杭州 310023)

摘 要:为利用产品型谱来表达参数可调型产品系列以符合市场覆盖的心理预期,基于优先数系提出了产品系列型谱的两种规划模型,其中交互系列规划模型适用于新产品设计,在规划时产品的型谱段范围和细分级数需要交互输入;自动系列规划模型力求找到最接近现有产品资源的系列级比和型谱,适用于适应性设计。利用浙江省某摩托车液压盘式制动器的产品族型谱规划实例,验证了所提模型的实用性与有效性。

关键词:产品型谱;产品平台;优先数系;交互系列规划;自动系列规划

中图分类号:TP391.72 **文献标识码:**A

Planning models for performance spectrum of product family based on preferred numbers

GAO Fei, MEI Kai-cheng, ZHANG Yuan-ming, LU Shu-fang, XIAO Gang

(College of Computer Science & Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: To accord with the psychological expectation of market coverage by using performance spectrum to represent product, two planning models of performance spectrum were proposed based on preferred numbers. In interactive planning model, the product spectrum range and subdivision series should be inputted manually, which was applied to new products design; in automatic planning model, the closest ratio of grade and spectrum to existing product resources was searched, which was suitable for adaptive design. The effectiveness and practicability of proposed model was verified by using the motorcycle-hydraulic-disk brake platform planning experiment of Zhejiang province.

Key words: performance spectrum; product platform; preferred numbers; interactive planning model; automotive planning model

0 引言

近年来,产品平台作为实施大批量定制的有效策略之一,有助于企业保证持续的竞争力、提升可持续发展和产品创新的能力,因此受到越来越多的关注^[1-2]。

在各种产品平台中,许多研究者围绕参数可调型产品平台展开了深入研究。Simpson 等^[3-4]指出产品平台由一组参数和特征组成,其中的参数在产品族中共享,称为平台参数,而产品族中的产品通过调节产品平台的定制参数派生得到,同时提出一种

产品平台的概念探索方法(Product Platform Concept Exploration Method, PPCEM)用于规划这种产品平台,在其应用实例中事先指定了三种产品族型谱,用于产品平台的优化规划,以分别满足 2\4\6 类客户群体。类似地,Nayak 等^[5]对 PPCEM 进行了扩展,提出一种平台设计方法的变化(Variation-Based Platform Design Methodology, VBPD)方法用于识别平台数与定制参数,该方法力求使产品族中每个个体都能达到性能上的最优,并以通用电机的扭矩作为产品族型谱参数和型谱系列,采用人工挑选的方式进行优化规划。朱屏等^[6]应用回归分

收稿日期:2014-01-08;修订日期:2014-06-13。Received 08 Jan. 2014; accepted 13 June 2014.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50705087,61402410);浙江省自然科学基金资助项目(LY13F020029,LQ14F020004)。Foundation items: Project supported by the National Natural Science Foundation, China(No. 50705087,61402410), and the Zhejiang Provincial Natural Science Foundation, China(No. LY13F020029,LQ14F020004).

析对设计变量与性能指标之间的隐含和不确定关系进行了分析,根据得到的最优回归方程来确定平台参数与个性参数,该方法未提及产品族型谱的选取与规划。Huang 等^[7]提出一种串联进化算法用于适应性设计中的产品平台定制开发,其中待规划的产品族型谱初始值从通用物料清单(Generic Bill of Material, GBOM)派生而来,主要关注如何重用产品平台。Li 等^[8]对 Huang 的进化算法进行改进,提出一种基于遗传算法的产品平台规划方法。Chen 等^[9]提出一种基于聚类分析和信息理论的平台参数确定方法。Qu 等^[10]提出用遗传算法辅助参与者和管理者进行产品平台的规划。Dai 等^[11]利用敏感度分析方法来确定可能的平台参数,产品族型谱值的选取采用模糊聚类的方法。Liu 等^[12]基于改进的遗传算法开发了参数可调型产品平台,并以无绳电钻为例,在给定扭矩范围内根据需要选取 n 个离散的产品族型谱进行规划。Li 等^[13]提出一种多目标进化算法,用于参数型产品平台的优化设计,以感应电动机的输出功率作为产品族型谱参数,并在代表不同市场细分的参数中各选取一个作为型谱值进行规划,该方法选择那些对产品性能产生明显影响的变量作为平台参数。

通常情况下,参数可调型产品平台需解决三方面的问题^[13]:①选择哪些型谱系列用于产品平台的优化规划;②确定哪些设计变量构成平台参数或定制参数;③建立产品平台优化规划模型,确定平台参数的取值。然而,前述方法^[5-6,8-10]主要集中于第②与第③个问题,对于第①个问题采用人工挑选的方式选择待规划的型谱系列;文献^[11]采用模糊聚类的方法确定型谱系列,其他方法则根据派生^[7]或区分细分市场方式^[3-4,12-13]进行针对性的挑选。事实上,产品型谱系列的选择问题是如何确定系列各型谱之间的级比。鉴于优先数系规划方法在符合市场覆盖的心理预期方面具有明显的优势^[14],具体而言,基于优先数系的产品族系列不仅能适应现有的需求并与需求的重点相吻合,而且可节省制造过程中样板、夹具和量具上的费用,同时,由于优先数系采用的变级比是以各规格的市场(销售)需求预测或已销售数据为基础,下面提出一种基于优先数系的产品族型谱规划模型。

1 交互系规划模型

假设产品主性能可由某个性能参数表达,例如

摩托车制动器通常由制动力矩表示,这一性能参数值可称为型谱。通常情况下,通过周密的市场调查与分析,总是能确定型谱的范围,然后由产品设计师、生产人员、销售人员等共同参与并探讨,将型谱范围分成不同的段, $B_i = [B_{i,\min}, B_{i,\max}]$, $i=1, 2, \dots, m$, 其中 $B_{i,\min}$ 和 $B_{i,\max}$ 表示第 i 段型谱的下限和上限, m 表示整个型谱的分段数。令 n'_i ($i=1, 2, \dots, m$) 表示事先估计的第 i 个型谱段内的细分级数,根据优先数系的定义^[14],满足

$$\sqrt[n'_i]{\frac{B_{i,\max}}{B_{i,\min}}} = \varphi'_i, \varphi_i = \sqrt[5]{10}. \quad (1)$$

式中: φ'_i 表示第 i 段型谱内的预估级比; $R_i = 5 \times 2^k$ ($k=0, 1, 2, \dots$) 表示对应于第 i 段型谱的标准级数; k 表示标准数系的中间变量。令 n_i 表示实际待规划得到的第 i 个型谱段内的细分级数, n'_i 对于 n_i 而言,带有一定的主观与误差,而且通常与十进制优先数系有一定偏差。为了获得几何分级所带来的优势,令 $\varphi'_i \approx \varphi_i$, 可通过式(2)计算得到与十进制优先数系相稳合的标准数系参数 R_i 、 φ_i 和 n_i :

$$R_i = 5 \times 2^k \approx \frac{n'_i}{\text{Log}(B_{i,\max}/B_{i,\min})};$$

$$k \approx \text{Ceiling}(\text{Lg}_2^{(5 \times \text{Log}(B_{i,\max}/B_{i,\min}))});$$

$$\varphi_i = \sqrt[5]{10};$$

$$n_i \approx \text{Ceiling}(\text{Lg}_{\varphi_i}^{B_{i,\max}/B_{i,\min}}). \quad (2)$$

式中: φ_i 表示经过规划得到的第 i 个型谱段符合十进制优先数系的实际级比, Log 表示以 10 为底的对数计算, Lg 表示对数计算, Ceiling 表示取大于或等于给定参数的最小整数。

上述标准数系参数确定之后,可根据式(3)计算得到各系列型谱:

$$B_{i,p} = B_{i,\min} \times \varphi_i^{p-1}, p = 1, \dots, n_i; i = 1, \dots, m. \quad (3)$$

上述规划模型需要设计师交互输入各型谱段的上下限 B_i 以及事先估计的各段的算术分级数 n'_i , 因此称为交互系列规划,它适用于产品创新设计。

2 自动系列规划模型

在自底向上的参数型产品平台规划中,通常选取现有的产品系列进行规划,然而,现有产品系列通常不符合优先数系的准则,具有一定的随意性,难以符合市场的心理预期。自动系列规划的数学模型主要适用于适应性的产品平台规划,它按照十进制标

准数系重新确定产品的系列型谱,同时又最大程度地覆盖原有的主参数系列型谱,即不损失原有的市场覆盖。自动系列规划的问题模型描述如图 1 所示。

已知:
 b_i :当前第*i*个产品的主性能参数值, $i=1, 2, \dots, n$
 寻求:
 q :产品型谱段数量
 n_i :第*i*个型谱段内的产品数量, $i=1, 2, \dots, q$
 φ_i :第*i*个型谱段内的级比, $i=1, 2, \dots, q$
 R_i :与 φ_i 对应的级数, $i=1, 2, \dots, q$
 $C_{i,j}$:经过规划得到的第*i*个型谱段内的第*j*个产品的主性能参数, $i=1, 2, \dots, q, j=1, 2, \dots, n_j$
 满足:
 存在从 $\{b_i | i=1, 2, \dots, n\}$ to $\{C_{ij} | i=1, 2, \dots, q, j=1, 2, \dots, n_j\}$ 的映射并使 b_i 最接近于 C_{ij}

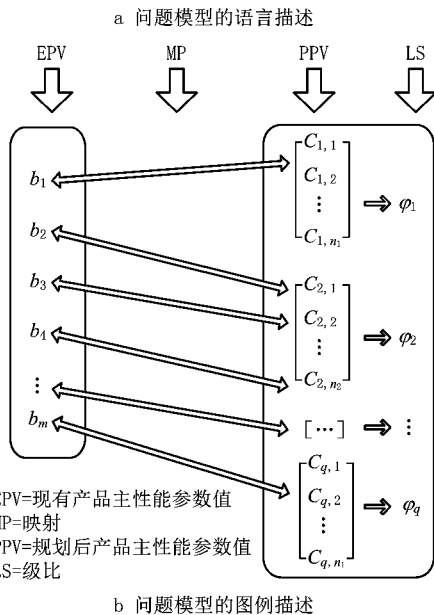


图1 自动系列规划的问题模型

通过深入分析上述问题模型,可将其转化为如下优化模型进行求解:

$$\begin{aligned} & \text{Find } q, n_i, \varphi_i, R_i; \\ & \min \sum_{i=1}^m (b_i - f(b_i))^2. \\ & \text{s. t. } q \geq 1 \text{ 且为整数;} \\ & f(b_i) = C_{k,j} \text{ 且 } \min_{1 \leq k \leq q, 1 \leq j \leq n_k} |b_i - C_{k,j}| \\ & C_{k,j} = C_{k,1} \times \varphi_k^{j-1}, 1 \leq k \leq q, 1 \leq j \leq n_k; \\ & \varphi_k = \sqrt[p]{10}, 1 \leq k \leq q; \\ & R_k = 5 \times 2^p, p=0, 1, 2, \dots, \\ & n_k \geq 1 \text{ 且为整数。} \end{aligned}$$

3 应用实例

以摩托车液压盘式制动器为例,说明上述产品

族系列规划模型的应用。摩托车液压盘式制动器的主性能参数是制动力矩(单位: $N \cdot m$)。对于交互式规划模型而言,在如图 2 所示的界面中,对应着列 1,2 和 3 分别输入 $B_{i,\min}, B_{i,\max}$ 和 n'_i ,则规划结果如图 3 所示。在图 3 中,第 3 列表示估计的产品系列数量,第 4 列表示规划得到的每个型谱段的系列数。显然,第 4 列小于第 3 列,表明采取优先数系的方式,用较少的产品系列数即可覆盖细分市场,例如,原本在型谱 100~300 $N \cdot m$ 计划利用 10 个产品系列进行市场覆盖,根据规划,只需 5 个产品系列即可。

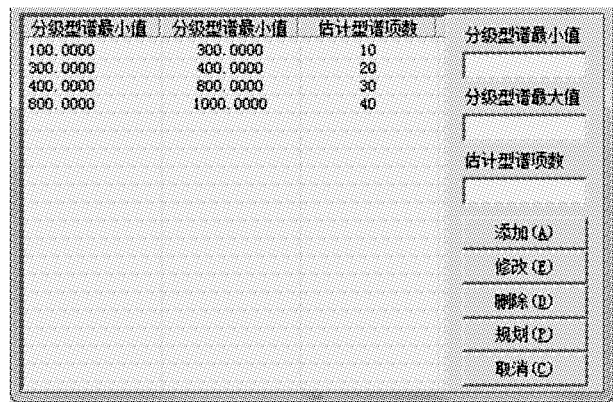


图2 交互系列规划界面

产品族优先数系规划

序号	型谱范围	估计项数	规划项数	标准数系	参数级比
1	100.0000~300.0000	10	5	R10	1.2580
2	300.0000~400.0000	20	10	R20	1.0300
3	400.0000~800.0000	30	25	R30	1.0300
4	800.0000~1000.0000	40	32	R320	1.0100

图3 交互规划结果示例

对于自动系列规划,浙江省某摩托车液压盘式制动器生产厂家拟采用产品平台方式对产品族进行重新设计,以覆盖现有的 51 种制动器。这些制动器以制动力矩作为系列划分的依据,图 4 所示的基于自动系列的规划模型实现了 51 个系列的自动规划数值表示,图 5 和图 6 以曲线图的方式对比显示了规划前后产品系列型谱值以及产品参数的分级特性。显然,刻度线“—□—”表示的型谱系列比等比规划能得到足够准确的适应性和覆盖率,另一方面

又能够保留采用标准数系的优点,得到更科学的型谱系列。图 6 展示了规划系列的分级特性,从其级距曲线可以看出,摩托车制动力矩的市场覆盖主要集中在系列编号 17~46 之间(级距起伏最小,表明市场细分程度较高),也即制动力矩在 242~378 N·m 之间,因此企业的产品平台应该重点在该型谱段内规划,且将主要生产力、市场策略集中于该段。

序号	原始系列	规划系列 (R80)	级距系列	标准数系	级距比
105	105	105	85	1.59	
112	106	111	840	1.06	
116	111	119	840	1.06	
141	115	149	R10	1.26	
144	118	150	R160	1.01	
151	122	138	R160	1.01	
159	125	151	R40	1.08	
161	129	163	R160	1.01	
172	133	173	R40	1.06	
191	137	194	R20	1.12	
195	141	196	R160	1.01	
197	145	198	R160	1.01	
217	150	222	R20	1.12	
218	154	224	R160	1.01	
222	159	225	R160	1.01	
242	164	240	R40	1.06	
244	168	242	R160	1.01	
250	174	248	R60	1.03	
255	179	255	R60	1.03	
257	184	259	R160	1.01	
268	190	267	R60	1.03	
273	195	275	R60	1.03	
275	201	278	R160	1.01	
278	207	281	R160	1.01	
290	213	289	R60	1.03	
294	220	292	R160	1.01	
299	225	301	R60	1.03	
301	233	304	R160	1.01	

图4 产品型谱自动系列规划结果

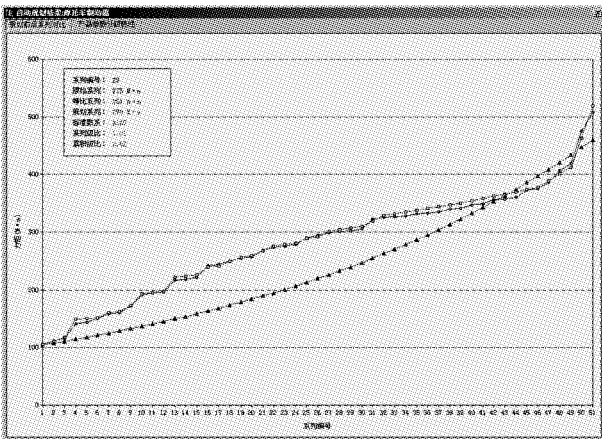


图5 产品型谱系列规划前后对比

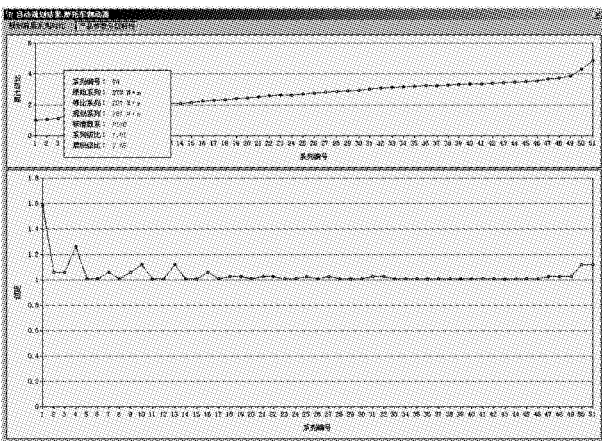


图6 产品型谱自动系列规划分级特性

基于以上分析,型谱系列规划完成后,产品平台规划的第①个问题就可以得到解决,然后企业可根据其细分程度重点选择一组型谱值,利用引言中现有的参数可调型产品平台优化规划方法,解决第②个和第③个问题,从而完成整个产品平台的规划。

4 方法讨论

产品族型谱规划带来的规划系列与企业生产现状的差异性,可能导致原有模具、夹具和量具等的更新甚至报废,从而影响企业的生产成本、利润以及用户需求的满足度。为此,在产品族规划过程中,需要仔细考虑设计、模具和加工等生命周期各因子的影响。以摩托车制动器为例,主要由整机厂家委托加工,整机厂主要是对其质量、安装尺寸、所需最低的制动力矩提出要求,如式(4)所示:

$$M_{\mu} = F \cdot i_F \cdot (D_2^2 \cdot N) / D_1^2 \cdot 2 \cdot De / 2 \cdot \mu \cdot \eta \tag{4}$$

制动力矩主要由 i_F, D_2, D_1, De 四个参数决定。式中: M_{μ} 表示制动力矩, F 表示手柄加载力, i_F 表示手柄杠杆比, D_2 表示制动钳缸径, D_1 表示制动泵缸径, De 表示制动盘的有效直径, μ 表示制动片与制动盘的摩擦系数, η 表示机械效率,由于手柄的杠杆比与模具相关性比较大,型谱规划之后的制动力矩可通过调整 D_2, D_1 和 De 来满足,这三个参数均由机加工工序完成,不会带来在刀具、夹具和量具(目前企业的刀具、夹具、量具的尺寸足以满足三种参数的各种规格)方面的成本影响,而 i_F 仍采用原有模块,因此,仔细考虑生命周期影响因子,并不会或者很少给夹具、量具及成本带来影响,详细策略可见文献[15-16]。

5 结束语

交互系列规划适用于新产品设计,在该规划模型中,每个型谱段的范围以前该型谱段内的细分级数需事先输入。为了克服经验性所导致的偏差,可由设计人员、销售人员、管理人员等共同参与。自动系列规划的目标是找到最接近现有产品资源的系列级比与型谱,后者将更符合市场覆盖的心理预期,适用于适应性设计的情况。

交互系列规划模型与自动系列规划模型主要用于产品平台中系列型谱的规划,即解决产品平台中如何选择产品系列用于平台规划更合理的问题,适用于参数可调型产品平台,即产品主性能通常可由

某个参数进行表达,例如摩托车制动器通常用制动力矩来表示系列型谱等,对于模块配置型产品平台,通常表现为核心抽象功能相似但横向功能模块变化较多,变化的功能模块通常为了满足不同细分的客户需求,例如小轿车的核心功能是运输,但完成这个功能需要从发动机、变速箱和制动器等众多模块中进行选配,客户关心的是通过这些模块配置得到的综合性能,二者的关注点不同,由此对企业生产将导致不同的影响;另一方面,通过型谱规划后得到的产品族对于市场覆盖将更具代表性,有助于企业后续配置模块的针对性开发。因此,如何选择现有产品族系列来进行平台规划将获得不同的结果,具体的选择策略和方法将作为下一步的工作进行深入研究。

参考文献:

- [1] DA SILVEIRA G, BORENSTEIN D, FOGLIATTO F S. Mass customization; literature review and research directions [J]. *International Journal of Production Economics*, 2001, 72(1): 1-13.
- [2] YANG T G, BEITER K A, LSHII K. Product platform development; considering product maturity and morphology[C]// *Proceedings of International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. Orlando, Fla., USA; ASME, 2005.
- [3] SIMPSON T W, JONATHAN R A M, MISTREE F. Product platform design; method and application[J]. *Research in Engineering Design*, 2001, 13(1): 2-22.
- [4] SIMPSON T W, D'SOUZA B S. Assessing variable levels of platform commonality within a product family using a multi-objective genetic algorithm[J]. *Concurrent Engineering: Research and Applications*, 2004, 12(2): 119-129.
- [5] NAYAK R U, CHEN W, SIMPSON T W. A variation-based method for product family design[J]. *Engineering Optimization*, 2002, 34(1): 65-81.
- [6] ZHU Bin, JIANG Pingyu, LONG Yiliang. Product platform variables planning method based on regression analysis and its web implementation[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2003, 9(12): 1067-1071 (in Chinese). [朱斌, 江平宇, 龙奕良. 产品平台参数的回归规划方法及 Web 实现[J]. *计算机集成制造系统*, 2003, 9(12): 1067-1071.]
- [7] HUANG G Q, LI L, CHEN X. A tandem evolutionary algorithm for platform product customization[J]. *Journal of Computing & Information Science in Engineering*, 2007, 7(2): 151-159.
- [8] LI L, HUANG G Q, NEWMAN S T. Interweaving genetic programming and genetic algorithm for structural and parametric optimization in adaptive platform product customization [J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2007, 23(6): 650-658.
- [9] CHEN C, WANG L. Product platform design through clustering analysis and information theoretical approach[J]. *International Journal of Production Research*, 2008, 46(15): 4259-4284.
- [10] QU T, BIN S, HUANG G Q, et al. Two-stage product platform development for mass customization[J]. *International Journal of Production Research*, 2011, 49(8): 2197-2219.
- [11] DAI Z H, SCOTT M J. Product platform design through sensitivity analysis and cluster analysis[J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2007, 18(1): 97-113.
- [12] LIU Z, WONG Y S, LEE K S. A manufacturing-oriented approach for multi-platforming product family design with modified genetic algorithm[J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2011, 22(6): 891-907.
- [13] LI Z K, FENG Y X, TAN J R, et al. A methodology to support product platform optimization using multi-objective evolutionary algorithms [J]. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 2008, 30(3/4): 295-312.
- [14] PAUL G, BEITZ W. *Engineering design*[M]. Berlin, Germany; Springer-Verlag, 1996.
- [15] GAO F, ZHANG Y M, XIAO G. A methodology to support platform parameters determination through considering main factors in product life cycle[J]. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2014, 27(5): 470-478.
- [16] GAO F, XIAO G, SIMPSON T W. Module-scale-based product platform planning[J]. *Research in Engineering Design*, 2009, 20(2): 129-141.

作者简介:

- 高飞(1974—),男,四川邻水人,教授,研究方向:数字化设计与制造、产品族设计等, E-mail: gfei_jack@163.com;
 梅凯城(1990—),男,浙江丽水人,硕士研究生,研究方向:数字化设计与制造、图像处理等;
 张元鸣(1977—),男,河南濮阳人,副教授,研究方向:大批量定制、工程数据库等;
 卢书芳(1984—),女,浙江富阳人,讲师,博士,研究方向:三维造型等;
 肖刚(1965—),男,浙江上虞人,教授,研究方向:数字化设计与制造等。