

文章编号: 1001-0920(2003)01-0058-04

基于品质功能展开的产品优化设计

唐加福, 刘士新, 庞士宗

(东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110004)

摘要: 研究品质功能展开(QFD)的产品优化设计问题, 考虑产品设计过程中的设计预算, 通过引进计划可达水平、实际可达水平等概念, 提出了产品优化设计的用户总体满意模型。该方法综合考虑了设计预算和各设计属性的实际可达水平需求以及各设计属性之间的相关性作用, 更能反映设计过程的实际情况。

关键词: 产品设计; 优化; 品质功能展开; 数学规划

中图分类号: O22 **文献标识码:** A

Quality function deployment based product optimization design

TAN G J ia-fu, L IU Shi-xin, PAN G Shi-zong

(School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: Product optimization design problem is considered with QFD. By introducing new concepts of actual achieved degree of attainment and planned degree of attainment of design attributes (DA), primary costs required, actual primary costs required and actual planned costs, a model embedding the constraints of design budget and some technical requirement is developed. With this model the relationship between degree of attainment of DAs, especially the budget allocation for them are explored. This model reflects the realworld quality design problem. An illustrated example is also presented.

Key words: Product design; Optimization; Quality function deployment; Mathematical programming

1 引言

在全球市场竞争日益激烈的今天, 用户满意已成为全球性公司在竞争中赢得市场的重要手段和企业的最终商业目标。基于用户需求的品质设计是实现用户满意的重要阶段, 其中品质功能展开(QFD)^[1-4]提供了一种具体的用于新产品开发的品质保证方法和工具。QFD 由 Aka o 教授^[1]于 20 世纪 60 年代末提出, 并迅速在日本、美国、欧洲得到了广泛应用, 被 ISO-9000 列为推荐手段。

在 QFD 方法中, 用户对产品的品质要求描述

为用户需求(CRs), 产品的品质特性用设计属性(DAs)(又称工程属性)来描述。QFD 方法的基本思想是在设计过程中, 将用户对产品的品质要求转化为用技术语言表达的产品品质特性(即设计属性), 然后通过制造等多个环节转换成最终产品。无论是新产品的开发还是产品革新改造的设计, 产品的用户需求与设计属性以及设计属性与设计属性之间, 都存在非常复杂的关系, 因此设定新产品设计属性值是该方法需要解决的关键问题。它们之间的关系常用品质表(HoQ)^[5-7]来表达, 如图 1 所示。

收稿日期: 2001-08-01; 修回日期: 2001-11-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(70002009); 教育部留学归国人员基金资助项目; 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室开放基金资助项目。

作者简介: 唐加福(1965—), 男, 湖南东安人, 教授, 博士, 从事模糊优化理论方法及应用、QFD 与产品优化设计等研究; 刘士新(1968—), 男, 辽宁铁岭人, 副教授, 博士, 从事工程调度、优化方法等研究。

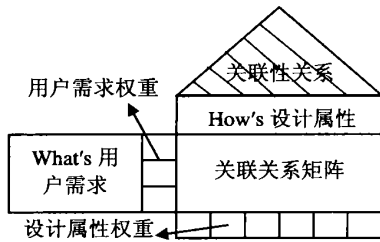


图 1 简化的品质表

在实际的产品设计过程中, 确定设计属性常用的方法有: 基于主观性的方法, 基于优先分配的启发式方法^[2, 8]和数学规划方法^[4, 6, 9, 10]。本文主要考虑在有限的产品开发(设计)资金预算的情况下, 如何确定产品各设计属性的目标水平, 以获得最大的总体满意水平。

2 问题描述与表达

假定在产品的设计过程中, 根据市场的调查, 有 m 个用户需求和 n 个设计属性, 分别用 $CR_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 和 $DA_j (j = 1, 2, \dots, n)$ 表示。

用户对产品的总体满意水平通过对各用户需求来获得。令各用户需求的权重为 $d_i (i = 1, 2, \dots, m)$, 表示用户需求 i 对总体满意水平贡献的相对度量; 类似地, 令设计属性的权重为 $w_j (j = 1, 2, \dots, n)$, 由 CR 与 DA 间的关联关系矩阵表达。关联关系矩阵 R 中的元素 $R_{ij} (i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n)$ 为第 j 个设计属性对第 i 个用户需求的影响程度, 如强、中、弱等。常用数量尺度, 如 1-3-9 或 1-9-15 分别表示弱、中、强。令 R_{ij} 的归一化为 $R_{ij}^* (i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n)$, 即 $0 < R_{ij}^* < 1$, 表示当第 j 个设计属性目标完全满足时, 对第 i 个用户需求满意程度的贡献。则有

$$w_j = \sum_{i=1}^m dR_{ij}^*, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

令第 j 个设计属性的目标水平 (DAT) 为 x_j , 表示设计属性达到的相对于设计目标值的百分数, 如 0.8。一般地, 设计属性之间存在关联性关系。令设计属性之间的关联矩阵为 T , 其元素 T_{ij} 代表关联因子, 其值表示设计属性之间的相关性程度。 $T_{ij} = 0$, 表示设计属性 i, j 之间无关联; $T_{ij} < 0$, 表示设计属性 i, j 之间相互冲突, 即反作用; 反之, 表示相互之间有正作用。 T_{ij} 的值可以数量化描述, 如 1-3-5-15, 其中: 1, 3, 5 分别表示不同设计属性之间相关性强度的弱、中、强关系; 15 定义为设计属性本身的关联度值(最大)。当然, 也可用不同的数量尺度来量化 T_{ij} 。归一化后, $T_{ij} \in (-1, 1]$ 。

从本质上说, T_{ij} 的值反映了设计属性 i 的改进对设计属性 j 所产生的贡献。在此意义上, 归一化的 T_{ij} 可解释为当第 i 个设计属性目标水平增加 1 个单位时, 第 j 个设计属性目标水平的变化(增加/减少)量。事实上, 在实际的产品设计中, 产品品质可通过提高单个或多个设计属性的水平值得到增强。

3 产品品质设计的优化模型

3.1 实际可达水平和计划可达水平

由于设计属性之间存在复杂的相关性, 因而对 x_j 与 x_i 之间关系 $x_j = f_j(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n)$ 的描述, 是一个复杂而重要的问题。多数文献是通过大量的数据采用拟合方式以线性形式表达, 不能清晰地描述和揭示设计属性之间的复杂相关性。本文借助于对 T_{ij} 的描述和解释, 引进设计属性的实际可达水平 (ADAT) 和计划可达水平 (PDAT), 通过描述设计属性的计划可达水平来反映设计属性间的关系。

实际可达水平表示 DA 实际达到的目标水平, 如 0.8 等。它不是设计工程师直接可控的, 而是通过 PDAT 实现的。计划可达水平是设计工程师通过设计资源直接(控制)设定的目标水平。通常, $PDAT < ADAT$ 。

令设计属性 j 的计划可达水平值为 y_j , 则相应的实际可达水平值 x_j 可表示为

$$x_j = y_j + \sum_{k=1}^n T_{kj} y_k = \sum_{k=1}^n T_{kj} y_k \quad (2)$$

从式(2)可以看出, 如果 $1 - \sum_{k=1}^n T_{kj} y_k = 0$, 则表示其他 DA 对第 j 个 DA 有很强(正)的关联性, 以致第 j 个 DA 的目标通过计划(设定)其他 DA 目标水平对其关联性来实现, 而无需对其设定计划可达水平, 即 $y_j = 0$ 。也就是说, 当其他 DA 计划可达水平达到一定程度时, 第 j 个 DA 的目标通过与其他 DA 的关联性来达到。 y_j 满足条件

$$0 < y_j + \sum_{k=1}^n T_{kj} y_k < 1, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

3.2 设计费用和设计预算的描述

假定在某产品的设计过程中需要多种资源, 如设计工程师、先进的仪器设备、工具、时间等。在策略计划层, 这些资源均可用费用来表示。根据过去的经验, 假设在不考虑其他设计属性投入的情况下, 达到某个 TA_j 的目标所需要的费用为 c_j , 称为基本费用需求。

为简单起见, 假定达到某个实际可达水平的费用函数 C_j 是实际可达水平的线性函数 x_j 。由于设计

属性之间的相关性作用, 达到某个 TA_j 的目标所需的费用称为实际基本需求费用

$$c_j^* = c_j \left(1 - \prod_{i,j} T_{ij} y_i \right) \quad (4)$$

实际可达水平由两部分组成: 一部分直接源于设计资源(费用)的投入; 另一部分间接源于其他设计属性的相关性作用。因此, 单从某个设计属性考虑, 达到某个设计属性 TA_j 的实际可达水平 x_j 所需的费用为实际计划费用, 它具有如下形式

$$C_j(x_j) = c_j^* x_j = c_j \left(1 - \prod_{k,j} T_{kj} y_k \right) \left(y_j + \prod_{k,j} T_{kj} y_k \right) \quad (5)$$

假定用于某产品设计(开发)的费用不能超过设计预算 B , 即

$$C(y) = \sum_{j=1}^n c_j \left(1 - \prod_{k,j} T_{kj} y_k \right) \prod_{k=1}^n T_{kj} y_k \leq B \quad (6)$$

3.3 总体满意水平为目标的产品优化设计模型

用户对产品的总体满意水平 S , 是用户对各用户需求满意水平 s_i 的权和, 而用户需求满意水平 s_i , 是设计属性 DA 的实际可达水平与关联关系矩阵的内积, 即

$$s_i = \sum_{j=1}^n R_{ij}^* x_j, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (7)$$

因而, 用户总体满意水平等价于

$$S = \sum_{j=1}^n w_j x_j \quad (8)$$

令

$$w_k^* = \sum_{j=1}^n w_j T_{kj}, \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

其中: w_k^* 代表由于设计属性之间的相关性作用, 第 k 个 DA 的单位计划可达水平对用户总体满意水平的贡献。因此, 以用户总体满意为目标的产品设计优化模型可描述为(P1)

$$\begin{aligned} \max S &= \sum_{k=1}^n w_k^* y_k \\ \text{s.t. } \beta_j \sum_{k=1}^n T_{kj} y_k &\leq 1, \quad j = 1, 2, \dots, n \\ C(y) &= \sum_{j=1}^n c_j \left(1 - \prod_{k,j} T_{kj} y_k \right) \prod_{k=1}^n T_{kj} y_k \leq B \\ 0 &\leq y_j \leq 1, \quad j = 1, 2, \dots, n \end{aligned}$$

其中: β_j 和 B 分别为用户可接受的设计属性实际可达水平值和设计总费用。 β_j 的取值反映了决策者的偏好和主观性。

4 实例与仿真结果

某公司开发一种新式铅笔, 根据市场调研, 用户对产品的需求(CR)主要包括易握(CR₁)、不易涂脏(CR₂)、笔尖不易折断(CR₃)、不易滚动(CR₄)4个方面。影响以上用户需求的设计属性(DA)主要包括铅笔的长度(DA₁)、两次削笔之间的时间间隔(DA₂)、产生的灰尘(DA₃)、形状(DA₄)、最少的残迹(DA₅)。用户需求、设计属性之间的关系如图2所示。

		DA ₁	DA ₂	DA ₃	DA ₄	DA ₅	
							DA ₁
							DA ₂
							DA ₃
							DA ₄
							DA ₅
d_i			●	●			
CR ₁	0.15	●			●		
CR ₂	0.25		●	●		●	
CR ₃	0.45	○	●	●		●	
CR ₄	0.15	○			●		
w_j	0.063	0.130	0.280	0.247	0.280		
w_k^*	0.063	0.224	0.442	0.247	0.442		

图 2 实例产品品质

产品设计预算 $B = 15.0(1000)$ 元, 期望设计费 $C_0 = 10.0(1000)$ 元, 各设计属性的基本费用需求如表1所示。用户需求与设计属性之间的关系弱、中、强采用 1-3-9 数量化, 设计属性之间的相关性按照 1-3-9-18 数量化, 得到

表 1 基本费用需求 $c_j (* 1000)$

	最可能值	最悲观值	最乐观值
DA ₁	10	9.8	10.2
DA ₂	4.0	3.8	4.2
DA ₃	5.0	4.9	5.1
DA ₄	3.0	2.9	3.1
DA ₅	6.0	5.8	6.2

$$R_{ij}^* = \begin{bmatrix} 0.25 & 0.00 & 0.00 & 0.75 & 0.00 \\ 0.00 & 0.19 & 0.405 & 0.00 & 0.405 \\ 0.023 & 0.185 & 0.396 & 0.00 & 0.396 \\ 0.10 & 0.00 & 0.00 & 0.90 & 0.00 \end{bmatrix}$$

$$T_{ij} = \begin{bmatrix} 1.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 1.0 & 0.167 & 0.0 & 0.167 \\ 0.0 & 0.167 & 1.0 & 0.0 & 0.5 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 1.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.167 & 0.5 & 0.0 & 1.0 \end{bmatrix}$$

用混合式遗传算法^[11,12]对 $\theta = 0.45$ 进行仿真, 结果如表2所示。从表2可以看出, 在没有设计预算约束的情况下, 为使各设计属性达到目标值

$$\text{i.e. } x_1 = x_2 = x_3 = x_4 = x_5 = 1.0$$

表 2 实例仿真结果及各方法的比较

设计属性	PDA T (y_j)	ADAT (x_j)	c_j (* 1 000)	c_j^* (* 1 000)	$c_j(y_j)$ (* 1 000)	S
DA ₁ #	1.0	1.0	10.00	10.00	10.00	
DA ₂ #	0.8073	1.0	4.00	3.229	3.229	
DA ₃ #	0.5770	1.0	5.00	2.885	2.885	
DA ₄ #	1.0	1.0	3.00	3.000	3.000	
DA ₅ #	0.5770	1.0	6.00	3.462	3.462	
总计#			28.00	22.5762	22.576	1.0
DA ₁ *		0.1336	10.00	10.00	1.336	
DA ₂ *		1.0	4.00	2.664	2.664	
DA ₃ *		1.0	5.00	5.000	5.000	
DA ₄ *		1.0	3.00	3.000	3.000	
DA ₅ *		1.0	6.00	3.000	3.000	
总计*			28.00	23.664	15.000	0.934
DA ₁ **	0.4500	0.4500	10.00	10.000	4.5000	
DA ₂ **	0.5135	0.7177	4.00	3.1832	2.2846	
DA ₃ **	0.6095	0.9999	5.00	3.0480	3.0480	
DA ₄ **	0.5029	0.5029	3.00	3.000	1.5088	
DA ₅ **	0.6095	0.9999	6.00	3.6576	3.6576	
总计**			28.00	22.8888	14.999	0.8058

注: # 无设计预算约束; * 设计预算 15 000(元) 时启发式方法; ** P1 模型

其相应计划可达水平分别为

$$y_1 = 1.0, \quad y_2 = 0.8073, \quad y_3 = 0.5770$$

$$y_4 = 1.0, \quad y_5 = 0.5770$$

用户总体满意水平为 1, 总设计费用为 22 576 元, 如表 2 第 1 部分所示。第 2 部分是在设计预算约束的情况下, 用启发式方法得到的设计方案, 尽管用户总体满意水平 0.934 较高, 但第 1 个设计属性目标水平太低, 不符合设计要求。第 3 部分是本文方法得到的结果, 既考虑了设计预算约束, 又满足了各设计属性的目标水平, 是一个合理的设计方案。

5 结 论

本文考虑产品设计过程中的设计预算, 通过引进计划可达水平、实际可达水平的概念, 提出产品优化设计的用户总体满意模型。该方法综合考虑了设计预算和各设计属性的实际可达水平需求以及各设计属性之间的相关性作用, 更易于为设计工作组所接受。

参考文献(References):

[1] Akao Y. *Quality Function Deployment: Integrating Customer Requirements into Product Design*[M]. Cambridge: Productivity Press, 1990

[2] Amacost R L. An AHP framework for prioritizing cus-

tom er requirements in QFD: An AHP prioritizing industrialized housing application [J]. *IIE Trans*, 1994, 26(4): 72-79.

[3] Bode J, Fung R Y K. Cost engineering with quality function deployment [J]. *Comput Indus Eng*, 1998, 35(3/4): 587-590

[4] Fung R Y K, Popplewell K, Xie J. An intelligent hybrid system for customer requirements analysis and product attribute targets determination [J]. *Int J Product Res*, 1998, 36(1): 13-34

[5] Hauser J R, Clausing D. The house of quality [J]. *Harv Busin Rev*, 1988, (May-June): 63-73

[6] Moskowitz H, Kim K J. QFD optimizer: A novice friendly quality function deployment decision support system for optimizing product designs [J]. *Comput Indus Eng*, 1997, 33(3): 641-655

[7] Matzler K, Hinterhuber H H. How to make product development projects more successful by integrating Kano's model of customer satisfaction into quality function deployment [J]. *Technovation*, 1998, 18(1): 25-38

[8] Wasemann G S. On how to prioritize design requirements during the QFD planning process [J]. *IIE Trans*, 1993, 25(3): 59-65

(下转第 65 页)

$$\prod_{i=1}^q \mu_i(z(t)) \mu_j(z(t)) \tilde{A}_{dij} \tilde{x}(t-h) \quad (23)$$

其中

$$\tilde{A}_{ij} = \begin{bmatrix} A_i + B_i K_j & - B_i K_j \\ 0 & A_i - G_i C_j \end{bmatrix}$$

$$\Delta \tilde{A}_{ij} = \begin{bmatrix} \Delta A_i + \Delta B_i K_j & - \Delta B_i K_j \\ \Delta A_i + \Delta B_i K_j & - \Delta B_i K_j \end{bmatrix}$$

$$\tilde{A}_{dij} = \begin{bmatrix} A_{di} & 0 \\ A_{di} & 0 \end{bmatrix}$$

根据假设 1, $\Delta \tilde{A}_{ij}$ 可表示成

$$\Delta \tilde{A}_{ij} = \tilde{D}_i \tilde{F}_i(t) \tilde{E}_{ij} \quad (24)$$

其中

$$\tilde{D}_i = \begin{bmatrix} D_i & 0 \\ 0 & D_i \end{bmatrix}, \quad \tilde{F}_i = \begin{bmatrix} F_i & 0 \\ 0 & F_i \end{bmatrix}$$

$$\tilde{E}_{ij} = \begin{bmatrix} E_{1i} + E_{2i} K_j & - E_{2i} K_j \\ E_{1i} + E_{2i} K_j & - E_{2i} K_j \end{bmatrix}$$

并且 $\tilde{F}_i^T \tilde{F}_i = I$.

对于系统(23)的渐近稳定性, 有如下定理:

定理 2 如果存在正定矩阵 P_{11}, P_{22} 和 S_{11}, S_{22} , 反馈增益和观测器增益矩阵 K_i 和 G_i , 使得如下线性矩阵不等式成立

$$\begin{bmatrix} \Theta_{ij} & (A_{di} + B_{di} Y_j)^T & X_{11} A_{di} \\ A_{di} + B_{di} Y_j & - Q & 0 \\ A_{di}^T X_{11} & 0 & - \frac{1}{2} I \end{bmatrix} < 0 \quad (25)$$

$$\begin{bmatrix} \Psi_{ij} & P_{22} D_i & P_{22} A_{di} & P_{22} \Gamma_{ij}^T \\ D_i^T P_{22} & - I & 0 & 0 \\ A_{di}^T P_{22} & 0 & - S_{11} & 0 \\ \Gamma_{ij} P_{22} & 0 & 0 & M_{11} \end{bmatrix} < 0 \quad (26)$$

则通过模糊控制器(20), 不确定模糊时滞系统是渐近稳定的(证明略).

5 结 论

本文利用模糊T-S模型对一类不确定时滞非线性系统进行建模, 得到模糊不确定时滞系统, 针对

此系统, 给出了模糊反馈和输出反馈控制设计方法, 并基于李亚普诺夫方法证明了模糊系统的稳定性.

参考文献(References):

- [1] Wang H O, Tanaka K, Griffin M F. An approach to fuzzy control of nonlinear systems: Stability and design issues[J]. *IEEE Trans Fuzzy Syst*, 1996, 4(1): 14-23
- [2] Tanaka K, Sugeno M. Stability analysis and design of fuzzy control systems[J]. *Fuzzy Sets Syst*, 1992, 45(2): 135-156
- [3] Ma X J, Sun Z Q. Analysis and design of fuzzy controller and fuzzy observer [J]. *IEEE Trans Fuzzy Syst*, 1998, 6(1): 41-51.
- [4] Tanaka K, Ikeda T, Wang H O. Robust stabilization of a class of uncertain nonlinear systems via fuzzy control: Quadratic stabilizability, H control theory and linear matrix inequalities[J]. *IEEE Trans Fuzzy Syst*, 1996, 4(1): 1-13
- [5] Tong Shaocheng, Zhou Jun. Fuzzy output feedback control for a class of uncertain nonlinear systems[J]. *Control and Decision*, 2001, 16(5): 540-544
- [6] Leung F H F, Lam H K, Tam P K S. Fuzzy control of a class of multivariable nonlinear systems subject to parameter uncertainties: Model reference approach[J]. *Int Appr Reas*, 2001, 26(2): 129-144
- [7] Takagi T, Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control[J]. *IEEE Trans Syst Man Cybern*, 1985, 15(1): 116-132
- [8] Tanaka K, Ikeda T, Wang H O. Fuzzy regulators and fuzzy observers: Relaxed stability conditions and LM F-based designs[J]. *IEEE Trans Fuzzy Syst*, 1998, 4(2): 250-265
- [9] Lee H J, Park J B, Chen G. Robust fuzzy control of nonlinear systems with parametric uncertainties [J]. *IEEE Trans Fuzzy Syst*, 2000, 9(2): 369-379.
- [10] Feng M, Harris C J. Feedback stabilization of fuzzy systems via linear matrix inequalities[J]. *Int J Science*, 2001, 32(2): 221-231.

(上接第 61 页)

- [9] Fung R Y K, Tang J, Tu Y, et al. Fuzzy financial optimization in product design using quality function deployment[J]. *Int Product Res*, 2002, 40(3): 585-599
- [10] Kim K, Moskowitz H, Dhingra A, et al. Fuzzy multicriteria models for quality function deployment[J]. *Europ J Oper Res*, 2000, 121: 504-518
- [11] Tang J, Wang D W, Ip A, et al. A hybrid genetic

- algorithm for a type of non-linear programming problem [J]. *Comput Math Appl*, 1998, 36(5): 11-21.
- [12] 唐加福, 汪定伟, 高振, 等. 面向非线性规划问题的混合式遗传算法[J]. *自动化学报*, 2000, 26(3): 401-404 (Tang J F, Wang D W, Gao Z, et al. Hybrid genetic algorithm to solve nonlinear programming problems [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2000, 26(3): 401-404)