

基于质量功能配置和欧氏范数的产品方案评价

穆 瑞

(厦门大学 机电工程系, 福建 厦门 361005)

摘要: 为建立面向顾客满意的贯穿产品全生命周期的方案评价模型, 对传统质量功能配置进行了改进, 实现了产品全生命周期的瀑布式分解. 由于方案中属性权重的确定对后续评价起着至关重要的作用, 利用 I-QFD-E(improved quality function deployment and entropy)方法获取指标权重值, 达到了主客观相结合的目的. 由于备选方案存在模糊性, 所以采用模糊理论中的欧氏范数对备选方案进行排序. 实例结果表明, 基于 I-QFD-E 和欧氏范数的产品方案评价方法能够得到面向顾客满意的最优方案.

关键词: 质量功能配置; 层次分析法; 熵; 模糊评价

中图分类号: TH 122

文献标识码: A

Evaluating Product Scheme Method Based on QFD and Euclid Norm

MU Rui

(Department of Mechanical & Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: In order to establish the scheme evaluation model oriented to customer satisfaction through the product life cycle, the traditional quality function deployment (QFD) is improved to actualize the waterfall disassembling. Since the attribute weight plays a vital role in the following evaluation, I-QFD-E method is brought forward to acquire the weight of each attribute. Analytic hierarchy process(AHP) is used to get the first weight, then the entropy theory is used to obtain the revised weight. In this way, the purpose of combing the subjective and objective weight together is fulfilled. Because the spare schemes own the fuzzy characteristic, the Euclid norm is used to sequence the schemes. It can be testified by the case that the method of I-QFD-E and Euclid norm can acquire the best scheme oriented to the customer satisfaction.

Key words: quality function deployment; analytic hierarchy process; entropy; fuzzy evaluation

现代产品设计理论强调顾客需求对产品设计过程的作用, 并认为应将顾客需求贯穿产品设计全过程^[1]. 产品概念设计是设计的中心环节, 如何在概念设计的这一中心环节综合考虑其对整个产品生命周期的影响, 需要系统化地确定与产品生命周期相关的各种要求, 并对这些需求进行有效的组织, 才能实现产品概念设计对产品生命周期性能的满足. 因而, 对产品生命周期各环节需求的全面认识与分析, 即以系统化方法进行产品需求建模, 全面搜集、获取、组织产品生命周期相关的需求信息, 是概念设计有效实施的必要前提和基础.

文章提出了一种基于质量功能配置和欧氏范数的模糊评价方法. 在分析了层次分析法(AHP)和传统质量功能配置(QFD)结构之后, 建立了改进的质量功能配置模型(IQFD 模型). 鉴于 AHP 存在主观性的缺陷, 采用熵理论中竞争性评估矩阵将产品设计要求权重与 AHP 方法主观权重值相结合(I-QFD-E)的方法, 获取综合设计要求的权重值, 进而在权重确定的基础上, 针对方案存在的模糊性特征, 利用欧氏范数对备选方案进行综合评价.

1 改进的质量功能配置(IQFD)框架与方法

通过对传统质量功能配置与 AHP 方法原理的分析, 发现传统的质量功能配置的展开过程所包含的 4 个阶段并没有涵盖产品的全生命周期, 同时传统质量屋在结构上将顾客要求与产品的设计要求的关联度设置于一个矩阵之中, 这是两种不同性质的指标, 使得很多多属性决策方法很难应用其中. 改进

收稿日期: 2009-09-19

基金项目: 国家自然科学基金(70772093)

第一作者: 穆 瑞(1982—), 女, 讲师, 工学博士, 主要研究方向为现代机械设计理论与方法. E-mail: iris_murui@yahoo.com.cn

的质量屋^[2-4]的递阶层次结构使得 AHP 方法可以应用其中. 基于以上考虑, 文章建立了面向顾客满意的贯穿产品全生命周期的质量功能配置模型, 称之为改进的质量功能配置模型, 如图 1 所示.

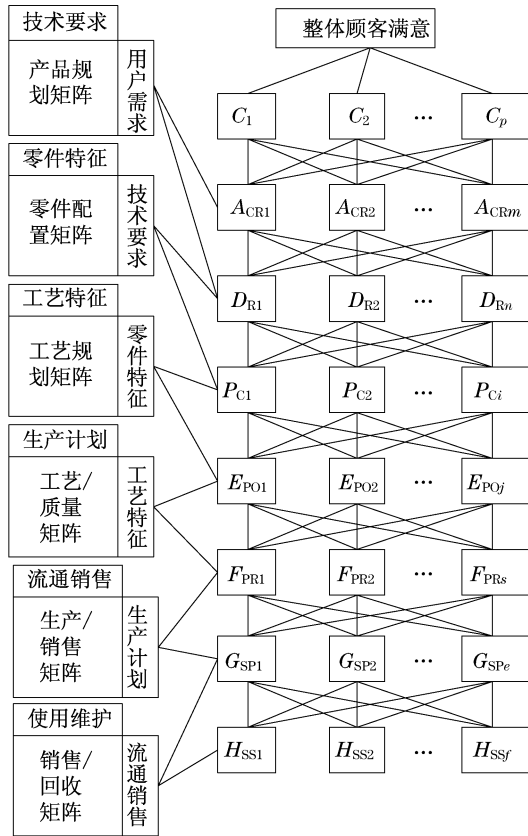


图1 改进的质量功能配置(IQFD)展开框架
Fig.1 Deploying frame of improved QFD

在 IQFD 模型中, 顾客要求权重的确定对应着顾客要求排序层次结构. 在这个层次结构中, 目标为整体顾客满意, 这也是产品或服务开发与设计的总体目标. 第 1 层 C 为准则层, 在确定顾客满意的准则时, 既要考虑产品方面的本身特性, 又要考虑顾客和社会方面的要求. 第 2 层 A 为顾客要求设计方案层, 这是产品开发小组对原始顾客要求经过创造性的加工整理的结果. 第 3 层到第 9 层分别对应于瀑布式分解中的技术要求层 D 、零件特征层 P 、工艺特征层 E 、生产计划层 F 、流通销售层 G 以及使用维护层 H . 由于 IQFD 展开框架中的 6 个质量屋的操作过程是相似的, 又由于在产品的设计过程中, 概念设计阶段对产品的质量起到至关重要的作用, 所以文章主要基于 IQFD 框架对产品规划质量屋进行详细研究. AHP 方法求得的设计要求对总目标的综合排序权重向量以 β 表示.

2 I-QFD-E 方法的产品方案评价模型与方法

设多属性决策问题的方案集为 $S = (S_1, S_2, \dots, S_m)$, 属性(或指标)集为 $O = (O_1, O_2, \dots, O_n)$, 评价矩阵

$$E = (e_{ij})_{m \times n} = (R_1, R_2, \dots, R_m)^T$$

式中: e_{ij} 表示第 i 个方案 S_i 对第 j 个属性 O_j 的属性值(设 e_{ij} 为经过标准化处理后的值, 即 $0 \leq e_{ij} \leq 1$); $R_i = (e_{i1}, e_{i2}, \dots, e_{in})$ 表示第 i 个方案 S_i 的评价值向量.

权重向量 $\omega = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n]$ 表示属性之间的相对重要度, $0 \leq \omega_j \leq 1$, $\sum_{j=1}^n \omega_j = 1$, ω_j 是属性 O_j 的权值, 则第 i 个方案的综合评价值为

$$Z_i(\omega) = R_i \diamond \omega^T \quad i = 1, 2, \dots, m$$

式中: \diamond 表示评价向量 R_i 以某一种形式与权重值向量 ω 相结合(当 R_i 与 ω 线性加权时, \diamond 即为点乘). 称 $Z(\omega) = [Z_1(\omega), Z_2(\omega), \dots, Z_m(\omega)]$ 为该多属性决策问题的综合评价向量, 称所有可能的评价向量组成的集合 $Z_m = \{Z(\omega) | \omega \in \omega^n\}$ 为该问题的 m 维综合评价向量集.

鉴于层次分析法应用于 IQFD 所产生的难以避免结果主观性的缺陷, 文章在 IQFD 方法确定先验性权重的基础上, 将熵权理论与 IQFD 方法相结合. 熵权法的基本思想^[5]是: 权数的熵权是在给定评价对象集合后, 各评价指标值确定的情况下, 描述各指标在竞争意义上的相对激烈程度的系数. 所以, 根据熵权可以对评价指标进行调整、增减, 以便做出更精确、可靠的评价. 因此, 文章提出用 I-QFD-E 方法来确定指标的综合权重值. I-QFD-E 方法的权重确定过程如下:

对一个由 m 个决策方案组成的方案集 $S = (S_1, S_2, \dots, S_m)$ 和 n 个目标的目标集 $O = (O_1, O_2, \dots, O_n)$ 的多属性决策问题, 若采用相应的隶属度公式或规范化公式得到其决策矩阵为

$$\mu = \begin{bmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} & \cdots & \mu_{1n} \\ \mu_{21} & \mu_{22} & \cdots & \mu_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \mu_{m1} & \mu_{m2} & \cdots & \mu_{mn} \end{bmatrix}$$

式中: μ_{ij} 为第 i 个方案中对第 j 项目标的隶属度, μ_{ij} 的差异越大, 则不同方案目标值的相对强度也越大, 目标对方案的比较作用也越大, 包含和传输的信息

也越多. 信息的增加意味着熵的减少, 熵可以用来度量这种信息量的大小^[5]. 记

$$p_{ij} = \frac{\mu_{ij}}{\sum_{j=1}^n \mu_{ij}} \quad i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

则目标 $O_j (j = 1, 2, \dots, n)$ 的信息熵值为

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij} \quad (2)$$

式中: $k = (\ln n)^{-1}$, $0 \leq e_j \leq 1$, 若 $p_{ij} = 0$, 则规定 $p_{ij} \ln p_{ij} = 0$.

于是第 j 项指标的客观权重为

$$\theta_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^n (1 - e_j)} \quad (3)$$

则 I-QFD-E 方法确定的设计要求权重值为

$$\begin{aligned} \mathbf{W} &= (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n) \\ \omega_j &= \frac{\theta_j \beta_j}{\sum_{j=1}^n (\theta_j \beta_j)} \quad 0 \leq \omega_j \leq 1, \sum_{j=1}^n \omega_j = 1 \end{aligned} \quad (4)$$

3 I-QFD-E 和欧氏范数的模糊评价方法

影响产品方案评价的因素很多, 并且有些因素往往是互相矛盾与排斥的. 在评价过程中, 可以采用多目标决策方法, 加入权重因子进行综合考虑^[6-11]. 在进行方案评价的时候, 首先, 面向顾客满意采用 I-QFD-E 方法确定各决策因素的权重; 其次针对方案的模糊性, 将决策因素进行量化; 最后, 在模糊多目标系统中, 用欧氏范数来描述备选方案与理想方案的比较作为选优的依据.

I-QFD-E 和欧氏范数的模糊评价模型描述及评价步骤如下:

假设有 n 个备选方案可供选择, 分别用 x_1, x_2, \dots, x_n 表示, 存在着 m 个影响顾客选择的关键因素, 分别用 f_1, f_2, \dots, f_m 来表示, 则关键因素目标集 $\mathbf{f}(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x))^T$ 表示目标空间, 方案集 $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 表示 n 个备选方案. 采用 I-QFD-E 方法确定权重向量 $\boldsymbol{\omega} = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m)^T$,

$$0 \leq \omega_i \leq 1 \text{ 且 } \sum_{i=1}^m \omega_i = 1, i = 1, 2, \dots, m.$$

加权向量 $\mathbf{g}(x) = \boldsymbol{\omega} \mathbf{f}(x)^T$ 的欧氏范数为 $\|\mathbf{g}(x)\|^2 = (\omega_1 f_1(x))^2 + (\omega_2 f_2(x))^2 + \dots +$

$$(\omega_m f_m(x))^2 = \sum_{i=1}^m \omega_i^2 f_i^2(x) \quad (5)$$

$$\text{令 } \omega'_i = \omega_i^2, \text{ 则 } \|\mathbf{g}(x)\|^2 = \sum_{i=1}^m \omega'_i f_i^2(x).$$

对最优方案的选择可以转化为一个模糊多目标评价问题.

对于统一模型(VP)

$$\begin{cases} \max_{x \in X} \mathbf{f}^1(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x))^T \\ \min_{x \in X} \mathbf{f}^2(x) = (f_{k+1}(x), f_{k+2}(x), \dots, f_m(x))^T \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\mathbf{f}^1(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x))^T$ 表示 k 个越大越好的指标; $\mathbf{f}^2(x) = (f_{k+1}(x), f_{k+2}(x), \dots, f_m(x))^T$ 表示 $(m-k)$ 个越小越好的指标.

这样的多目标评价问题存在目标间的不可公度性和目标间的矛盾性. 为了消除这些影响, 必须将多目标问题转化为单目标问题. 文章引用模糊理论中隶属度的概念, 将决策问题转化为相对隶属度矩阵后再处理.

(1) 将多目标问题转化为单目标问题(SP). 文章采用升、降半梯的方式求得各指标的相对优值隶属度, 则相对优值隶属度矩阵为

$$\mathbf{R} = (r_{ij})_{m \times n} = (\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2, \dots, \mathbf{R}_n) \quad (7)$$

$\mathbf{R}_j = (r_{1j}, r_{2j}, \dots, r_{mj})^T$ 为备选方案 X_j 的相对优值隶属度向量.

(2) 影响因素的目标权重采用 I-QFD-E 方法获得.

(3) 加权欧氏范数的描述. 加权向量 $\mathbf{s}(x_j) = (\omega_1 r_{1j}, \omega_2 r_{2j}, \dots, \omega_m r_{mj})$ 的欧氏范数为

$$\begin{aligned} \|\mathbf{s}(x_j)\|^2 &= (\omega_1 r_{1j})^2 + (\omega_2 r_{2j})^2 + \dots + (\omega_m r_{mj})^2 = \\ &= \sum_{i=1}^m (\omega_i^2 r_{ij}^2) = \sum_{i=1}^m (\omega'_i r_{ij}^2) \end{aligned}$$

按照最优原则, 确定最理想点 \mathbf{f}_0 为

$$\mathbf{f}_0 = (f_1^0, f_2^0, \dots, f_m^0)^T = (\bar{f}_1, \bar{f}_2, \dots, \bar{f}_k, f_{k+1}, f_{k+2}, \dots, f_m)^T$$

于是统一模型(VP)可转化为单目标问题(SP):

$$\max_j \alpha(x_j) = \sqrt{\|\mathbf{s}(x_j)\|^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^m (\omega'_i r_{ij}^2)} \quad (8)$$

4 例证分析

以冰箱产品为例, 通过对顾客需求的研究与整理, 构造产品的设计要求指标结构图, 建立的递阶层次结构如图 2 所示.

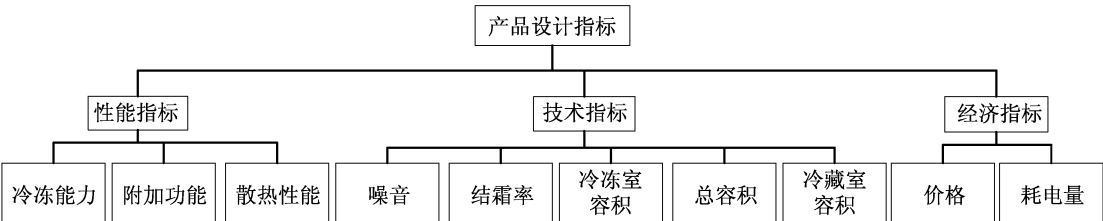


图 2 冰箱设计要求指标结构图

Fig.2 Structure graph of design requirement guidelines

首先将层次分析法应用于以顾客满意为准则的顾客要求判断矩阵中. 经整理, 顾客要求共有 6 项, 分别为制冷速度快、耗电量低、噪音小、功能多、价格低和容量大. 首先采用专家打分法建立以顾客满意 T_{CS} 为准则的顾客要求判断矩阵, 如表 1 所示.

表 1 以顾客满意为准则的顾客要求判断矩阵

Tab.1 Customer requirement judging matrix oriented to customer satisfaction

T_{CS}	A_{CR1}	A_{CR2}	A_{CR3}	A_{CR4}	A_{CR5}	A_{CR6}
A_{CR1}	1.000	2.000	4.000	6.000	5.000	4.000
A_{CR2}	0.500	1.000	4.000	0.500	1.000	2.000
A_{CR3}	0.250	0.250	1.000	0.330	2.000	2.000
A_{CR4}	0.167	2.000	3.000	1.000	2.000	1.000
A_{CR5}	0.200	1.000	0.500	0.500	1.000	1.000
A_{CR6}	0.250	0.500	0.500	1.000	1.000	1.000

接着, 分别建立以各顾客要求为准则的产品设计要求判断矩阵, 运用比例标度构造设计要求的判断矩阵得到表 2 中每一行的数值. 采用递阶质量屋方法对各质量要素进行权重计算, 结果如表 2 所示.

求出设计要求关于整体顾客满意的综合权重并经归一化整理得

表 2 冰箱设计系统的递阶质量屋

Tab.2 Hierarchical house of quality of the refrigerator system

顾客要求	顾客要求权重	各设计要求权重									
		总容积	冷藏室容积	冷冻室容积	冷冻能力	额定耗电量	价格	附加功能	散热性能	噪音	结霜率
制冷速度快	0.408	0.042	0.042	0.042	0.298	0.054	0.053	0.059	0.117	0.128	0.164
耗电量低	0.164	0.041	0.041	0.041	0.121	0.244	0.044	0.129	0.134	0.109	0.093
噪音小	0.101	0.043	0.043	0.043	0.093	0.061	0.052	0.121	0.140	0.284	0.120
功能多	0.160	0.033	0.033	0.033	0.104	0.082	0.064	0.288	0.161	0.077	0.123
价格低	0.080	0.048	0.048	0.048	0.077	0.089	0.238	0.162	0.113	0.095	0.081
容量大	0.087	0.165	0.165	0.165	0.082	0.084	0.056	0.091	0.083	0.053	0.054

各设计要求的熵 $E(\omega_i)$ 和权重 ω_i 的计算结果见表 3. 则 I-QFD-E 方法得到的权重值经计算可得

$$\omega_D = (0.049, 0.049, 0.049, 0.181, 0.103, 0.063, 0.117, 0.127, 0.136, 0.126)$$

根据 T. L. Saaty 提出的一致性判断条件 $I_{C.R.} \leq 0.10$, 经计算, 本例中 $I_{C.R.} = 0.05 < 0.10$. 此冰箱的改进质量屋的展开精度对于整体顾客满意目标而言是可接受的.

针对冰箱产品的 10 项设计要求, 本例中共收集到 4 个相应的设计方案, 建立产品设计指标的竞争性评估矩阵为

$$X = \begin{bmatrix} 254 & 225 & 209 & 219 \\ 170 & 145 & 129 & 147 \\ 84 & 80 & 80 & 72 \\ 24 & 15 & 4 & 20 \\ 0.88 & 0.69 & 0.55 & 0.62 \\ 3400 & 3380 & 3499 & 3540 \\ 8 & 7 & 6 & 6 \\ 5 & 6 & 6 & 8 \\ 3 & 3 & 1 & 1 \\ 1 & 3 & 1 & 3 \end{bmatrix}$$

$$\omega^* = (0.002, 0.004, 0.001, 0.414, 0.026, 0.001, 0.016, 0.032, 0.261, 0.242)$$

表 3 设计要求熵值和权重对照表

Tab.3 Comparison of design requirement between entropy values and weights

设计要求	总容积	冷藏室容积	冷冻室容积	冷冻能力	额定耗电量	价格	附加功能	散热性能	噪音	结霜率
$E(\omega_i)$	0.998	0.996	0.999	0.900	0.989	0.999	0.994	0.989	0.906	0.906
ω_i	0.007	0.013	0.003	0.329	0.036	0.003	0.020	0.036	0.276	0.276

根据相对优值隶属度公式,可得矩阵 R 为

$$R = \begin{bmatrix} 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 0.625 & 0.994 & 1.000 & 0.625 & 0.330 & 1.000 \\ 0.886 & 0.853 & 0.952 & 0.625 & 0.797 & 1.000 & 0.875 & 0.750 & 0.330 & 0.330 \\ 0.823 & 0.759 & 0.952 & 0.167 & 1.000 & 0.966 & 0.750 & 0.750 & 1.000 & 1.000 \\ 0.862 & 0.865 & 0.857 & 0.833 & 0.887 & 0.955 & 0.750 & 1.000 & 1.000 & 0.330 \end{bmatrix}$$

计算得 4 个备选方案的欧氏范数为 $\|s(x)\| = (0.488, 0.286, 0.364, 0.442)^T$, 则 4 个备选方案的排序为 $1 > 4 > 3 > 2$, 则最佳方案为方案 1.

从以上实例验证过程中可以发现,AHP 方法中冷冻能力的权重最大,3 项性能指标的权重为噪音>散热性能>结霜率,3 项容积指标的权重最小;熵权法中冷冻能力的权重最大,结霜率的权重得到了改善,散热性能的权重被弱化,冷冻室容积的权重最小.经计算 I-QFD-E 方法获得的冷冻能力的权重值最大,对于冰箱产品来说是必须保证的,冷冻室容积的权重最小,其他依次是噪音>结霜率>散热性能,这是符合顾客要求的.进而在权重确定的基础上,采用模糊理论确定各指标的隶属度,应用欧氏范数衡量各方案的优劣,得出最能满足顾客需求的方案是方案 1.

5 结 论

QFD 是一种面向顾客满意的产品开发理论,为此基于 QFD 构建了产品方案的评价模型与方法.在拓展了传统的 QFD 模型的基础上,以顾客满意为目标引入 AHP 方法来确定先验的顾客要求权重以及相应的设计要求权重,通过竞争性评估矩阵利用熵权理论求得综合的设计要求权重,解决了传统方法主观确定、难以达到客观的问题.对于备选方案中存在模糊性的问题,可以在确定指标权重的基础上,采用模糊理论中的欧氏范数对备选方案进行排序.实例结果表明,该方法能够得到面向顾客满意的最优方案,为产品方案的评价工作提供了有力的理论支持.

参考文献:

[1] 王美清,唐晓青.产品设计中的用户需求与产品质量特征映射方法研究[J].机械工程学报,2004,40(5):136.

WANG Meiqing, TANG Xiaoqing. Mapping customer requirement to product quality characteristics [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(5): 136.

[2] Armacost R L, Mullens M A, Swart W W. An AHP framework for prioritizing customer requirements in QFD: an industrialized housing application[J]. IIE Transactions, 1994, 26(4): 72.

[3] Chuang P T. Combining the analytic hierarchy process and quality function deployment for a location decision from a requirement perspective [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2001, 18(11): 842.

[4] 刘鸿恩.质量功能展开问题解决理论与方法研究[D].上海:上海交通大学安泰经济与管理学院,2001.

LIU Hong'en. Research of problem-solving theory and method on QFD [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University. Antai College of Economics & Management, 2001.

[5] 邱苑华.管理决策与应用熵学[M].北京:机械工业出版社,2002.

QIU Wanhua. Management decision and applied entropy theory [M]. Beijing, China Machine Press, 2002.

[6] Kwong C K, Bai H. A fuzzy AHP approach to the determination of importance weights of customer requirements in quality function deployment[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2002, 13: 367.

[7] 李荣钧.模糊多准则决策理论与应用[M].北京:科学技术出版社,2002.

LI Rongjun. Fuzzy multiple criteria decision theory and application [M]. Beijing: Science and Technical Press, 2002.

[8] Lai K C, Ming L W. A systematic approach to quality function deployment with a full illustrative example [J]. The International Journal of Management Science, Omega, 2005, 33: 119.

[9] Chan L K, Kao H P, Wu M L. Rating the importance of customer needs in quality function deployment by fuzzy and entropy methods[J]. Int J Prod Res, 1999, 37(11): 2499.

[10] Chen C T, Lin C T, Huang S F. A fuzzy approach for supplier evaluation and selection in supply chain management [J]. International Journal of Production Economics, 2006, 102: 289.

[11] Olcer A I, Odabasi A Y. A new fuzzy multiple attributive group decision making methodology and its application to propulsion/manoeuvring system selection problem[J]. European Journal of Operational Research, 2005, 166: 93.