

文章编号:1000-582X(2011)01-036-06

数控装备质量的模糊物元综合评价方法

张根保¹, 庞继红^{1,2}, 陈国华¹, 葛红玉¹

(1. 重庆大学 机械工程学院, 重庆 400044; 2. 广西工学院 管理系, 广西 柳州 545006)

摘要:针对数控装备质量多层次指标评价问题,提出了一种基于模糊物元模型的综合评价方法。该方法利用模糊物元理论分析多个质量特性及其属性特征,并建立了数控装备质量综合评价模型。采用层次分析法和信息熵确定评价指标权重,建立基于最小二乘法的优化组合权重模型计算组合权重,并运用模糊物元法给出评价结果。实例研究表明该方法可行、合理。

关键词:计算机数控;装备;质量评价;模糊物元;层次分析法;信息熵

中图分类号:TH111

文献标志码:A

A comprehensive evaluation method of fuzzy matter element for CNC equipment quality

ZHANG Gen-bao¹, PANG Ji-hong^{1,2}, CHEN Guo-hua¹, GE Hong-yu¹

(1. College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China;

2. Department of Management, Guangxi University of Technology, Liuzhou, Guangxi 545006, P. R. China)

Abstract: A comprehensive evaluation method based on fuzzy matter element analysis is proposed to solve problems of multiple performance and quality evaluation for computer numerical control (CNC) equipment. The fuzzy matter element theory is utilized to analyze multi-scale quality characteristics and attributes. Then, the comprehensive quality evaluation model for CNC equipment is founded by using fuzzy matter element analysis method. Analytic hierarchy process (AHP) and information entropy are applied to obtain the objective index weights. Furthermore, the combinational weight is calculated with the optimal mathematics model based on the least square method. Finally, the fuzzy matter element method is used to determine the assessment result. The case study indicates that the method has a certain rationality and feasibility.

Key words: computer numerical control; equipment; quality evaluation; fuzzy matter element; analytical hierarchy process; information entropy

国家“十一五”规划提出了重点发展智能化装备,即数控装备,以提高中国装备制造业的综合竞争力。数控装备是制造工业现代化的重要基础,一旦出现故障而停产将造成重大事故和损失。大型航空

件、大型汽轮机的叶片等复杂装备加工质量和效率在很大程度上取决于高精度和超精密工作母机的质量水平。因此,随着企业产品水平及用户要求的不断提高,数控装备的工作可靠性、加工精度、工作性

收稿日期:2010-08-20

基金项目:国家 863 计划资助项目(2009AA04Z119);国家自然科学基金资助项目(50835008);国家“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项(2009ZX04014-016;2009ZX04001-013;2009ZX04001-023);数字制造装备与技术国家重点实验室(华中科技大学)开放基金资助项目

作者简介:张根保(1953-),男,重庆大学教授,博士生导师,主要研究方向为现代质量工程、先进制造技术、可重构制造装备和企业信息化等,(E-mail)gen. bao. zhang@263. net。

能等质量要求也越来越高^[1-2]。

数控装备的产量和技术水平在很大程度上代表了制造业技术水平和综合实力,因此对数控装备质量进行综合评价显得尤为重要。目前国内外针对质量的评价方法主要有专家评分法、层次分析法 (Analytical Hierarchy Process, AHP)、模糊集 (Fuzzy Sets)、物元分析法 (Matter Element)、质量功能配置 (Quality Function Deployment, QFD) 等^[3-8]。其中,文献[3]将模糊物元应用于绿色产品评价,提出了基于物元的综合评价方法;文献[4]应用层次分析法综合分析发动机各性能参数,建立了综合评价模型并进行定量综合评价;文献[5]对多个质量特性指标进行研究,提出了基于数据包络分析、主成分分析法和数值分类法的综合方法,对产品质量进行分析和评价的方法;文献[6]提出了应用模糊数据包络分析和 QFD 的综合方法评价产品设计质量;文献[7]基于 QFD 方法将产品再制造质量特性与顾客满意度相结合,构建了产品再制造质量特性质量屋的评价模型;文献[8]构建了排序的分散模型依次分析质量变量,并应用三元顺序尺度的方法评价产品质量。

以上评价方法主要从主观和客观方面对数控装备质量进行评价。主观评价体现了指标的价值量,但是难以避免主观因素的影响;客观评价体现了信息量,但是计算结果可能与实际情况不符合。为了保证质量评价的科学性和全面性,充分利用主客观评价的优点,笔者提出利用物元分析原理并结合模糊集理论,采用 AHP 和信息熵综合的评价方法,建立基于最小二乘法的优化组合权重模型计算组合权重,提高评价的准确性,全面、客观地评价数控装备综合质量。

1 数控装备质量评价指标分析

数控装备具有加工质量稳定、高精度、高速、高柔性、高超信息处理能力和适合于复杂产品制造等特点,可极大地提高产品的质量和档次,缩短生产周期,提高市场竞争能力,满足现代制造业的制造加工需求。产品质量可表示为一组固有特性满足要求的程度^[9]。产品质量具有多个质量特性 (Quality Characteristics, QCs),质量特性在外在和内在特性各方面的综合结果构成了产品的“适用性”,即产品在使用过程中满足顾客目标的程度^[10-11]。由于数控装备质量特性的多元性和模糊性,数控装备质量的评价是一个需要考虑模糊信息和决策空间离散的模糊多属性决策 (Fuzzy Multi-attribute Decision

making, FMADM) 问题。

数控装备质量主要是应用质量特性进行描述,是所有质量特性综合结果的体现。由于数控装备质量评价所涉及到的质量特性较多,各质量特性之间的关系较复杂,而且某些特性指标之间相互影响、相互制约,不能简单地使用定性或定量的单一方法进行评价。因此,必须建立一整套评价指标体系,且指标可以随企业和客户的需求而相应变化,具有动态调整性。评价指标体系的建立一般遵循评价的目的性、完整性、科学性和可扩展性等原则。根据以上原则,通过对多种类型的数控装备进行深入细致的调查研究和分析,并结合已有文献的评价指标,将数控装备的质量特性指标进行相应分类和整理,从数控装备的技术性、经济性和社会性 3 个大方面指标体系进行综合质量评价,综合质量评价体系模型如图 1 所示。

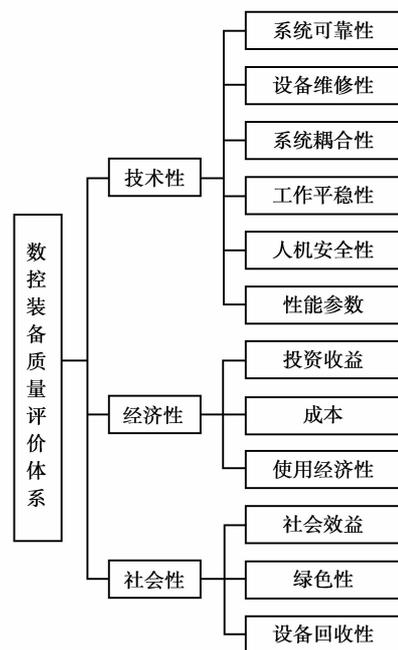


图 1 数控装备质量评价体系模型

2 基于模糊物元的质量评价模型

2.1 模糊物元综合评价

物元分析使用事件的名称、特征和量值 3 个基本要素来描述事物^[12]。在模糊物元分析中,描述的事物 M 及特征 C 和模糊量值 V 组成物元 $R = (M, C, V)$ ^[13-15]。对于 m 个比较事物各自的 n 维模糊物元组合形成 m 个比较事物 n 维复合模糊物元,表示为

$$\mathbf{R}_{mm} = \begin{bmatrix} & M_1 & M_2 & \cdots & M_m \\ C_1 & x_{(11)} & x_{(21)} & \cdots & x_{(m_1)} \\ C_2 & x_{(12)} & x_{(22)} & \cdots & x_{(m_2)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ C_n & x_{(1n)} & x_{(2n)} & \cdots & x_{(nm)} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: M_m 为比较事物, C_n 是比较事物的特征, 与 C_n 相对应的量值为 $x_{(nm)}$ 。

为把模糊物元矩阵转换为隶属度矩阵, 消除不同指标之间量纲的差异, 需要引入从优隶属度。这里采用极差变换法进行计算。

越大越优型:

$$\mu_{ji} = \frac{X_{ji} - \min X_{ji}}{\max X_{ji} - \min X_{ji}}. \quad (2)$$

越小越优型:

$$\mu_{ji} = \frac{\max X_{ji} - X_{ji}}{\max X_{ji} - \min X_{ji}}. \quad (3)$$

式中: X_{ji} 是第 j 个事物第 i 项指标的量值; μ_{ji} 是对应指标的从优隶属度。由此构建从优隶属度模糊物元记为 $\tilde{\mathbf{R}}_{mm}$, 其表达式为

$$\tilde{\mathbf{R}}_{mm} = \begin{bmatrix} & M_1 & M_2 & \cdots & M_m \\ C_1 & \mu_{(x11)} & \mu_{(x21)} & \cdots & \mu_{(xm1)} \\ C_2 & \mu_{(x12)} & \mu_{(x22)} & \cdots & \mu_{(xm2)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ C_n & \mu_{(x1n)} & \mu_{(x2n)} & \cdots & \mu_{(xmn)} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

由于模糊物元中指标的差异, 以 \mathbf{R}_w 表示每一个方案各评价指标的权重, 对 $\tilde{\mathbf{R}}_{mm}$ 和 \mathbf{R}_w 矩阵采用加权平均处理。则

$$\tilde{\mathbf{R}}_k = \mathbf{R}_w \times \tilde{\mathbf{R}}_{mm} = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & \cdots & M_m \\ H_j & H_1 & H_2 & H_m \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中: \times 表示 $M(\cdot, +)$ 运算, 即先乘后加运算,

$$H_j = \sum_{i=1}^n W_i \times \mu_{mi}.$$

2.2 基于最小二乘法的 AHP 和信息熵确定组合权重

AHP 是一种合理地将定性与定量的决策结合起来多方案或多目标的决策方法, 通过计算方案重要性程度的权重, 为最佳方案的选择提供依据, 广泛应用于各领域方面的评价^[16]。但是层次分析法存在决策者主观认定的数值或相对重要性的不准确值当作准确值处理, 判断矩阵的一致性与人们思维的一致性具有显著差异等方面的缺点^[17]。为避免主观因素造成评价结果的偏差, 应用信息熵法确定客观权重系数, 运用斯皮尔曼等级相关 (Spearman Rank Correlation, SRC) 系数反映主客观权重之间

联系的密切程度, 根据密切程度应用最小二乘法进行主客观方面的综合评价^[18]。

评价决策中所获得信息的多少决定了评价的精度和可靠性大小。信息熵是一个信息状态的不确定程度的度量^[19]。应用信息熵确定权重系数, 先对决策矩阵进行规范化处理, 得到规范化矩阵 \mathbf{R} , 利用向量归一化法规范化矩阵, 得到归一标准化矩阵 $\mathbf{Y} = (y_{ij})_{m \times n}$ 。

然后计算第 j 项指标的熵

$$E_j = -K \sum_{i=1}^m p_{ij} \cdot \ln p_{ij}. \quad (6)$$

式中: $K = 1/\ln m$; $0 \leq E_j \leq 1$; $p_{ij} = y_{ij} / \sum_{i=1}^m y_{ij}$, $1 \leq i \leq m$, $1 \leq j \leq n$ 。

定义指标权重 e_j 为第 j 项指标的权重系数, 即

$$e_j = (1 - E_j) / \sum_{j=1}^n (1 - E_j), \quad (7)$$

式中: $0 \leq j \leq n$; $0 \leq e_j \leq 1$; $\sum_{j=1}^n e_j = 1$ 。

最后通过规范化处理, 计算出信息熵权重

$$\mathbf{W}_k = [\omega_{k1}, \omega_{k2}, \dots, \omega_{kn}]^T. \quad (8)$$

应用 AHP 计算的主观权重

$$\mathbf{W}_z = [\omega_{z1}, \omega_{z2}, \dots, \omega_{zn}]^T.$$

计算主客观优化组合权重

$$\mathbf{W} = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n]^T.$$

假设具有 m 项评价指标和 n 个评价对象的标准化后的矩阵为 $\mathbf{X} = (x_{ij})_{m \times n}$ 。第 i 个评价对象的评价值为

$$f_i = \sum_{j=1}^n \omega_j x_{ij}, \quad (i = 1, 2, \dots, n). \quad (9)$$

对于所有评价对象的所有指标, 主客观评价下的评价值偏差应当越小越好, 为此建立最小二乘法优化组合评价模型。

$$\min H(\omega) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \{ [(\omega_{kj} - \omega_j) \times x_{ij}]^2 + [(\omega_{sj} - \omega_j) \times x_{ij}]^2 \},$$

$$\text{Subject to } \sum_{j=1}^n \omega_j = 1, \omega_j \geq 0, (j = 1, 2, \dots, m).$$

构建 Lagrange 函数:

$$L = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \{ [(\omega_{kj} - \omega_j) \times x_{ij}]^2 + [(\omega_{sj} - \omega_j) \times x_{ij}]^2 \} + 4\lambda (\sum_{j=1}^n \omega_j - 1),$$

令

$$\frac{\partial L}{\partial \omega_j} = - \sum_{i=1}^m 2(\omega_{sj} + \omega_{kj} - 2\omega_j) +$$

$$4\lambda(\sum_{j=1}^n w_j - 1)x_{ij}^2 + 4\lambda = 0,$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = 4(\sum_{j=1}^n w_j - 1) = 0,$$

应用矩阵表示为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{e} \\ \mathbf{e}^T & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{W} \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

式中: \mathbf{A} 为 $n \times n$ 对角阵; \mathbf{e} 、 \mathbf{W} 、 \mathbf{B} 均为向量;

$$\mathbf{A} = \text{diag}[\sum_{i=1}^m x_{i1}^2, \sum_{i=1}^m x_{i2}^2, \dots, \sum_{i=1}^m x_{in}^2];$$

$$\mathbf{e} = [1, 1, \dots, 1]^T;$$

$$\mathbf{W} = [w_1, w_2, \dots, w_n]^T;$$

$$\mathbf{B} = \left[\sum_{i=1}^m \frac{1}{2}(w_{z1} + z_{k1}) \times x_{i1}^2, \sum_{i=1}^m \frac{1}{2}(w_{z2} + w_{k2}) \times x_{i2}^2, \dots, \sum_{i=1}^m \frac{1}{2}(w_{z1} + w_{k1}) \times x_{in}^2 \right]^T.$$

解上面的矩阵得到组合权重

$$\mathbf{W} = \mathbf{A}^{-1} \cdot \left[\mathbf{B} + \frac{1 - \mathbf{e}^T \mathbf{A}^{-1} \mathbf{B}}{\mathbf{e}^T \mathbf{A}^{-1} \mathbf{e}} \cdot \mathbf{e} \right]. \quad (11)$$

3 数控装备质量综合评价实例分析

数控技术应用最早和最成功的应用行业是制造业。数控机床作为装备制造业的核心技术应用,是现代制造业的关键设备。因此,对数控机床质量进行评价具有重要的现实意义。笔者以某系列的精密立式数控铣床(加工中心)为例,从价格、加工精度、可靠性和性能 4 个方面对数控机床进行综合质量评价。确定质量综合评价指标: C_1 , 价格(万元), C_2 , 定位精度(mm), C_3 , 重复定位精度(mm), C_4 , 最小分辨率(μm), C_5 , 平均无故障工作时间(Mean Time Between Failures, MTBF)(h), C_6 , 平均维修时间(Mean Time To Repair, MTTR)(h), C_7 , 使用可用度 $A(\%)$, C_8 , 故障率 $\lambda(t)(\%)$, C_9 , 主轴最大转速(r/min), C_{10} , 换刀时间(点对点)(s), C_{11} , 进给速度(mm/min)。在综合评价指标中,越大越优型指标有 C_5 、 C_7 、 C_9 、 C_{11} ,其余属于越小越优型指标。选择 5 台价格在 20 万元左右的数控铣床,其质量特性指标如表 1 所示。

表 1 数控机床质量特性指标

序号	价格/ 万元	定位 精度/ mm	重复定位 精度/ mm	最小 分辨率/ μm	MTBF/ h	MTTR/ h	使用 可用度 A / %	故障率 $\lambda(t)$ / %	主轴最大 转速/ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	换刀 时间/ s	给进速度/ ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)
1	23.6	0.02	0.005	0.5	600	4.6	96.26	0.015	8 000	6.5	16
2	20.8	0.05	0.004	0.2	750	5.3	94.23	0.012	7 500	7.5	18
3	25.5	0.03	0.003	0.3	650	5.8	90.58	0.019	8 500	6.0	20
4	19.8	0.05	0.006	0.5	750	5.5	92.86	0.018	7 000	7.0	17
5	20.2	0.04	0.005	0.6	700	6.2	93.72	0.011	8 000	7.5	15

根据公式(6)、(7)和(8)计算各质量特性指标的信息熵权重为

$$\mathbf{W}_k = [0.0280, 0.2850, 0.0755, 0.3748, 0.0205, 0.0273, 0.0011, 0.1271, 0.0122,$$

0.0280, 0.0205]。

通过对质量特性的分析和专家咨询,由专家和用户应用 AHP 确定指标层的判断矩阵

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 4 & 1 & 6 & 5 & 9 & 2 & 7 & 3 & 5 \\ 1/2 & 1 & 2 & 1/2 & 3 & 2 & 6 & 1 & 5 & 4 & 4 \\ 1/4 & 1/2 & 1 & 1/4 & 2 & 1 & 3 & 1 & 2 & 3 & 2 \\ 1 & 2 & 4 & 1 & 2 & 3 & 7 & 1 & 6 & 4 & 5 \\ 1/6 & 1/3 & 1/2 & 1/2 & 1 & 1 & 2 & 1/2 & 4 & 5 & 6 \\ 1/5 & 1/2 & 1 & 1/3 & 1 & 1 & 2 & 1/2 & 3 & 2 & 2 \\ 1/9 & 1/6 & 1/3 & 1/7 & 1/2 & 1/2 & 1 & 1/4 & 1 & 1/2 & 1/2 \\ 1/2 & 1 & 1 & 1 & 2 & 2 & 4 & 1 & 3 & 3 & 2 \\ 1/7 & 1/5 & 1/2 & 1/6 & 1/4 & 1/3 & 1 & 1/3 & 1 & 1 & 1/2 \\ 1/3 & 1/4 & 1/3 & 1/4 & 1/5 & 1/2 & 2 & 1/3 & 1 & 1 & 1 \\ 1/5 & 1/4 & 1/2 & 1/5 & 1/6 & 1/2 & 2 & 1/2 & 2 & 1 & 1 \end{bmatrix}.$$

根据 Saaty 提出的一致性判断条件 $CR < 0.1$, 对判断矩阵进行一致性检验:

$$\lambda = 11.6231, CR = 0.0410 < 0.1.$$

由上式可知,判断矩阵具有满意的一致性。

经过计算,AHP 法的评价权重向量为

$$W_z = [0.2298, 0.1362, 0.0757, 0.1844, 0.0737, 0.0648, 0.0254, 0.1105, 0.0275, 0.0351, 0.0369].$$

接着,计算信息熵和 AHP 评价权重的斯皮尔

$$\tilde{R}_{mm} = \begin{bmatrix} & M_1 & M_2 & M_3 & M_4 & M_5 \\ C_1 & 0.3333 & 0.8246 & 0.0000 & 1.0000 & 0.9298 \\ C_2 & 1.0000 & 0.0000 & 0.6667 & 0.0000 & 0.3333 \\ C_3 & 0.3333 & 0.6667 & 1.0000 & 0.0000 & 0.3333 \\ C_4 & 0.2500 & 1.0000 & 0.7500 & 0.2500 & 0.0000 \\ C_5 & 0.0000 & 1.0000 & 0.3333 & 1.0000 & 0.6667 \\ C_6 & 1.0000 & 0.5625 & 0.2500 & 0.4375 & 0.0000 \\ C_7 & 1.0000 & 0.6426 & 0.0000 & 0.4014 & 0.5528 \\ C_8 & 0.5000 & 0.8750 & 0.0000 & 0.1250 & 1.0000 \\ C_9 & 0.6667 & 0.3333 & 1.0000 & 0.0000 & 0.6667 \\ C_{10} & 0.6667 & 0.0000 & 1.0000 & 0.3333 & 0.0000 \\ C_{11} & 0.2000 & 0.6000 & 1.0000 & 0.4000 & 0.0000 \end{bmatrix}.$$

由公式(4)和(5),得到最后的评价结果

$$\tilde{R}_k = \begin{bmatrix} & M_1 & M_2 & M_3 & M_4 & M_5 \\ H_j & 0.5095 & 0.6290 & 0.4995 & 0.4077 & 0.4643 \end{bmatrix}.$$

根据排序结果,得到数控机床的综合质量排序:

$M_2 > M_1 > M_3 > M_5 > M_4$ 。由排序结果可知序号为 2 的数控机床在同系列机床中的综合质量最好。

4 结 语

1) 数控装备多层次指标质量综合评价是一个复杂的问题。笔者利用物元分析原理并结合模糊集理论,采用 AHP 和信息熵综合评价方法,建立基于最小二乘法的优化组合权重模型计算组合权重,提高评价的准确性和合理性,为数控装备综合质量评价提供一个新的思路。

2) 该方法能够考虑尽可能多的信息,从定性和定量相结合进行综合评价,计算方法简便,并且容易进行计算机编程,使实际操作更为现实、便利和快捷。

3) 评价结果符合客观实际,表明该方法用于数控装备质量评价是可行的,为企业和客户决策提供较为可靠的科学依据。

曼等级相关系数 $SRC = 0.85$,表明两者之间具有较大的密切程度。因此用最小二乘法对两者进行优化组合,利用 Matlab 软件根据上述公式编程得出组合权重

$$W = [0.1279, 0.0761, 0.0804, 0.0847, 0.1226, 0.0754, 0.0899, 0.0979, 0.0958, 0.0745, 0.0748].$$

根据式(2)和(3),构建从优隶属度模糊物元

参 考 文 献:

- [1] 陈雪峰,曹宏瑞,何正嘉. 数字化制造装备的主轴服役性能监测与诊断[J]. 机械工程学报, 2009, 45(5): 140-146.
CHEN XUE-FENG, CAO HONG-RUI, HE ZHENG-JIA. Monitoring and diagnosis of spindle service performance of digitized manufacturing equipment[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(5): 140-146.
- [2] 周祖德,谭跃刚,王汉熙. 探讨数字制造科学内涵,展望制造全球化未来[J]. 国际学术动态, 2007(4): 17-20.
ZHOU ZU-DE, TAN YUE-GANG, WANG HAN-XI. Discussing the scientific meaning of digitalize manufacturing, and looking into the future of globalized manufacturing[J]. International Academic Developments, 2007(4): 17-20.
- [3] 刘志峰,王淑旺,万举勇,等. 基于模糊物元的绿色产品评价方法[J]. 中国机械工程, 2007, 18(2): 166-170.
LIU ZHI-FENG, WANG SHU-WANG, WAN JU-

- YONG, et al. Green product assessment method based on fuzzy-matter element [J]. *China Mechanical Engineering*, 2007, 18(2): 166-170.
- [4] 张志强, 徐斌, 何勇灵, 等. 基于 AHP 评价方法的发动机性能评价[J]. *兵工学报*, 2008, 29(5): 625-628.
ZHANG ZHI-QIANG, XU BIN, HE YONG-LING, et al. Engine performance evaluation based on analytic hierarchy process [J]. *Acta Armamentarii*, 2008, 29(5): 625-628.
- [5] AZADEH A, GHADERI S F, AHMADABAD M F. Multi criteria quality assessment of products by integrated DEA-PCA approach [J]. *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering*, 2007, 14(3): 201-218.
- [6] PAL R, MITRA J, PAL M N. Evaluation of relative performance of product designs: a fuzzy DEA approach to quality function deployment [J]. *Opsearch*, 2007, 44(4): 322-336.
- [7] 李菲, 沈虹. 面向再制造的产品质量特性评价方法[J]. *现代制造工程*, 2008(11): 99-102.
LI FEI, SHEN HONG. Study of evaluation method of product quality characteristics for remanufacturing [J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2008 (11): 99-102.
- [8] BASHKANSKY E, GADRICH T. Evaluating quality measured on a ternary ordinal scale [J]. *Quality and Reliability Engineering International*, 2008, 24 (8): 957-971.
- [9] KOVACH J, CHO B R, ANTONY J. Development of an experiment-based robust design paradigm for multiple quality characteristics using physical programming [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2008, 35 (11/12) : 1100-1112.
- [10] WU F C, CHYU C C. Optimization of correlated multiple quality characteristics robust design using principal component analysis [J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2004, 23(2) : 134-143.
- [11] AGGARWAL A, SINGH H, KUMAR P, et al. Optimization of multiple quality characteristics for CNC turning under cryogenic cutting environment using desirability function [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 205(1/3): 42-50.
- [12] 黄剑, 周林, 栗秋华, 等. 基于物元分析理论的电能质量综合评估 [J]. *重庆大学学报: 自然科学版*, 2007, 30(6): 25-29.
HUANG JIAN, ZHOU LIN, LI QIU-HUA, et al. Evaluation of power quality based on the method of Matter-element [J]. *Journal of Chongqing University: Natural Science Edition*, 2007, 30(6): 25-29.
- [13] ZHAO Y W, ZHANG G X. A new integrated design method based on fuzzy matter-element optimization [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, 129 (1/3): 612-618.
- [14] YIN Y C, SUN L F, GUO C. A policy of conflict negotiation based on fuzzy matter element particle swarm optimization in distributed collaborative creative design [J]. *Computer-Aided Design*, 2008, 40(10/11): 1009-1014.
- [15] ZHAO Y W, HUANG F L, LI Z F, et al. Research in method of reliability optimization based-on multi-objective fuzzy matter-element with fuzzy chance constraint [J]. *Key Engineering Materials*, 2006, 315/316: 430-435.
- [16] MAHDI I M, ALRESHAID K. Decision support system for selecting the proper project delivery method using analytical hierarchy process (AHP) [J]. *International Journal of Project Management*, 2005, 23(7): 564-572.
- [17] HU H A, HSU C W, KUO T C, et al. Risk evaluation of green components to hazardous substance using FMEA and FAHP [J]. *Expert Systems with Applications*, 2009, 36(3): 7142-7147.
- [18] 袁杰, 史海波, 刘昶. 基于最小二乘拟合的模糊隶属函数构建方法 [J]. *控制与决策*, 2008, 23 (11): 1263-1266.
YUAN JIE, SHI HAI-BO, LIU CHANG. Construction of fuzzy membership functions based on least squares fitting [J]. *Control and Decision*, 2008, 23(11): 1263-1266.
- [19] SALEH M. Estimating market shares in each market segment using the information entropy concept [J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2006, 190(2): 1735-1739.