基于多属性决策灵敏度分析的供弹机压弹机构优化设计

杨丽[1,2]，孙志礼[1]，印明昂[1]，王宇宁[1]
（1. 东北大学 机械工程与自动化学院，辽宁 沈阳 110819；2. 沈阳理工大学 装备工程学院，辽宁 沈阳 110159）

摘要：灵敏度分析是多属性决策的一个重要优化过程，深入分析属性值或属性权重的变化对决策结果的影响很有意义。在线性加权模型的基础上，提出一种灵敏度分析方法，研究了一个属性值或者多个相关属性值同时发生变动以及一个属性权重或者多个相关属性权重同时发生变动下的灵敏度问题，给出一种定量化计算方法，计算出保持原决策排序结果不变的属性及属性权重的灵敏度临界值或稳定区间。通过某小口径火炮供弹机实例验证了该方法的科学性和可行性，计算结果可为供弹机优化设计提供参考。

关键词：系统工程方法论；多属性决策；属性值；属性权重；灵敏度分析；供弹机
中图分类号：C934；TP301.6　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1000-1093(2014)02-0241-07
DOI：10.3969/j.issn.1000-1093.2014.02.016

Optimization Design of Cartridge Pressing Structure for Feed Mechanism Based on the Sensitivity Analysis of Multi-attribute Decision Making

YANG Li[1,2], SUN Zhi-li[1], YIN Ming-ang[1], WANG Yu-ning[1]
(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China;
2. School of Equipment Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, Liaoning, China)

Abstract: Sensitivity analysis is an important optimization process of multi-attribute decision making, of which thorough analysis of attribute values or change of attribute weights makes great sense in making decision. On the basis of the linear weighting model, a sensitivity analysis method is proposed, the sensitivity problem which is caused by the change of an attribute value or more related attribute values and the change of an attribute weight or more related attribute weights is researched, and the critical value or the stable interval of sensitivity which keeps the original sort result of decision unchangeable are calculated by a quantitative calculation method. The example about some small-bore artillery feed mechanism shows that the method is scientific and feasible.

Key words: system engineering methodology; multi-attribute decision making; attribute value; attribute weight; sensitivity analysis; feed mechanism

0 引言

多属性决策是现代决策科学的重要组成部分，其理论和方法被广泛应用于社会、经济、管理和军事等多个领域[1-5]。近年来机械设计领域也广泛应用这种方法。决策就是为了实现一定的目标，提出实现目标的各种可行性方案，依据评定准则和标准，在多种备选方案中，选出一个方案的过程。在多属性

收稿日期：2013-08-20
基金项目：国家自然科学基金项目(51205052)
作者简介：杨丽(1980—)，女，副教授，博士研究生。E-mail：yangli.024@163.com；
孙志礼(1957—)，男，教授，博士生导师。E-mail：zhlsun@mail.neu.edu.cn

决策分析中,决策者需要知道决策结果的稳定性,即决策属性的变化对决策结果,也就是方案排序结果的影响程度。若决策属性的灵敏度高,则方案排序结果不稳定;若决策属性的灵敏度低,则方案排序结果稳定。因此,灵敏度分析成为了多属性决策问题的一个重要研究分支,能够有效地揭示属性值以及属性权重与决策结果的内在变化规律。

国内外众多学者对多属性决策的灵敏度分析进行了研究。Starr[6] 和 Evans[7] 研究了方案排序结果不变情况下属性权重的最大变化区域问题;French 等[8]采用最小距离法确定当前最优方案的潜在竞争者;Traintaphyllou 等[9] 从最灵敏方案的角度对属性值和属性权重的灵敏度进行了研究;Armacost 等[10]对基于层次分析法的多属性决策灵敏度分析进行了研究;国内学者吴超等[11] 对区间数的多属性决策中的权重灵敏度进行了分析;樊治平等[12] 提出了基于 OWA 算子的群决策方法的灵敏度分析。

多属性灵敏度分析的研究中大部分都存在这样一个缺点:更多考虑一个属性值或者逐一考虑属性权重变化对决策结果的影响。但是在实际应用中,只对属性值逐个分析是片面的,由于决策问题中某些属性之间具有一定的相关性,一个属性值的变化必然会引起另外一些属性值的变化。另外,所有属性权重之和为 1,一个属性权重的变化将引起其他所有属性权重的变化。针对上述问题,探讨了多个相关属性值或属性权重同时发生变化时,保持方案排序结果不变的属性及属性权重的临界值或稳定区间。

1 多属性决策基本理论

1.1 原始决策矩阵

在多属性决策问题中,$P=\{P_1,P_2,\cdots,P_m\}$ 表示 m 个方案的集合,每个方案有 n 个属性,$I=\{I_1,I_2,\cdots,I_n\}$ 表示属性的集合。第 i 个方案的第 j 个属性值用 $a_{ij}(i=1,2,\cdots,m;j=1,2,\cdots,n)$ 表示,则 $\boldsymbol{A}=(a_{ij})_{m\times n}$为原始决策矩阵。行号表示方案,列号表示属性。

1.2 规范化决策矩阵

原始决策矩阵规范化的方法常用有线性比例变换法、极差变换法和比重变换法等[13],考虑到属性中的某个极值视为常数,将其他属性值进行规范化处理时,以便进行灵敏度分析。故采用比重变换法来对原始决策矩阵进行规范化处理:

当 I_j 为效益型属性时,

$$x_{ij}=a_{ij}\Big/\sum_{i=1}^{m}a_{ij};\tag{1}$$

当 I_j 为成本型属性时,

$$x_{ij}=(1/a_{ij})\Big/\left(\sum_{i=1}^{m}1/a_{ij}\right).\tag{2}$$

由(1)式和(2)式得到规范化的决策矩阵 $\boldsymbol{X}=(x_{ij})_{m\times n}$.

1.3 方案综合评价值

属性集合 $I=\{I_1,I_2,\cdots,I_n\}$ 所对应的属性权重向量为 $\boldsymbol{W}=(w_1,w_2,\cdots,w_n)$,其中 $\sum_{j=1}^{n}w_j=1$, $0\leqslant w_j\leqslant 1(j=1,2,\cdots,n)$. 则方案 i 的综合评价值为

$$y_i=\sum_{j=1}^{n}w_jx_{ij},i=1,2,\cdots,m.\tag{3}$$

根据 y_i 的大小,便可得到方案排序的结果,如果 $y'_1>y'_2>\cdots>y'_m$,则方案优劣顺序为 $P'_1>P'_2>\cdots>P'_m$.

1.4 灵敏度分析

将规范化决策矩阵 $\boldsymbol{X}=(x_{ij})_{m\times n}$ 中每个方案所对应的行向量根据方案优劣顺序 $P'_1>P'_2>\cdots>P'_m$ 调整为矩阵 $\boldsymbol{S}=(s_{ij})_{m\times n}$:

$$\boldsymbol{S}=\begin{bmatrix}s_1\\ \vdots\\ s_i\\ \vdots\\ s_m\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}x'_{11}&\cdots&x'_{1j}&\cdots&x'_{1n}\\ \vdots&\vdots&\vdots&\vdots&\vdots\\ x'_{i1}&\cdots&x'_{ij}&\cdots&x'_{in}\\ \vdots&\vdots&\vdots&\vdots&\vdots\\ x'_{m1}&\cdots&x'_{mj}&\cdots&x'_{mn}\end{bmatrix}.\tag{4}$$

$\boldsymbol{S}=(s_{ij})_{m\times n}$中的第一行行向量所对应的方案即最优方案 P'_1,依此类推,最后一排行向量对应的方案即最劣方案 P'_m. 称 $\boldsymbol{S}=(s_{ij})_{m\times n}$为决策结果排序矩阵。

为了辅助进行属性值和属性权重的灵敏度分析,由 $\boldsymbol{S}=(s_{ij})_{m\times n}$得到如下形式的矩阵:

$$\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix}r_1\\ r_2\\ \vdots\\ r_i\\ \vdots\\ r_{m-1}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}s_1-s_2\\ s_2-s_3\\ \vdots\\ s_i-s_{i+1}\\ \vdots\\ s_{m-1}-s_m\end{bmatrix}.\tag{5}$$

由方案的排序即优劣顺序可知,$\boldsymbol{R}=(r_{ij})_{(m-1)\times n}$ 显然满足 $\boldsymbol{R}\cdot(w_1,w_2,\cdots,w_n)^{\mathrm{T}}>\boldsymbol{0}$.

当某一方案的某一属性值或权重向量发生改变时,使 $\boldsymbol{R}\cdot(w_1,w_2,\cdots,w_n)^{\mathrm{T}}$ 这个列向量中的某个元素等于 0 或小于 0,等于 0 时所对应的属性值或属

性权重值是属性(或权重)临界值,基于此建立属性或属性权重的灵敏度分析模型。

2　属性值灵敏度分析

2.1　单一属性值灵敏度分析

如果方案优劣顺序 $P_1' > P_2' > \cdots > P_m'$ 中的方案 $P_i'(i=1,2,\cdots,m)$ 的属性 $I_j(j=1,2,\cdots,n)$ 对应的属性值 a_{ij}'的变动幅度为 δ_{ij},则改变后的属性值为 $a_{ij}'(1+\delta_{ij})$,由此引起的规范化之后的属性值为

当 I_j 为效益型属性时,

$$x_{ij}' = a_{ij}'(1+\delta_{ij}) \Big/ \left(\sum_{l=1}^{m} a_{lj}' + a_{ij}'\delta_{ij} \right),$$

$$x_{kj}' = a_{kj}' \Big/ \left(\sum_{l=1}^{m} a_{lj}' + a_{ij}'\delta_{ij} \right),\ k=1,2,\cdots,m,\ k \neq i; \tag{6}$$

当 I_j 为成本型属性时,

$$x_{ij}' = 1/[a_{ij}'(1+\delta_{ij})] \Big/ \left[\sum_{l=1}^{m} 1/(a_{lj}' + a_{lj}'\delta_{ij}) \right],$$

$$x_{kj}' = 1/a_{kj}' \Big/ \left[\sum_{l=1}^{m} 1/(a_{lj}' + a_{lj}'\delta_{ij}) \right],$$

$$k=1,2,\cdots,m, k \neq i. \tag{7}$$

根据 $\boldsymbol{S}=(s_{ij})_{m\times n}$的变化对矩阵 $\boldsymbol{R}=(r_{ij})_{(m-1)\times n}$ 做相应的处理。为了保证在方案 $P_i'(i=1,2,\cdots,m)$ 的属性 $I_j(j=1,2,\cdots,n)$ 对应的属性值 a_{ij}'发生变动的情况下,原决策排序结果保持不变,建立如下的线性规划模型:

$$\begin{cases} \max\ \delta_{ij},\ i=1,2,\cdots,m,\ j=1,2,\cdots,n, \\ \text{s. t.}\ \ r_k \cdot (w_1, w_2, \cdots, w_n)^{\mathrm{T}} \geqslant 0,\ k=1,2,\cdots,m-1; \end{cases} \tag{8}$$

$$\begin{cases} \min\ \delta_{ij},\ i=1,2,\cdots,m,\ j=1,2,\cdots,n, \\ \text{s. t.}\ \ r_k \cdot (w_1, w_2, \cdots, w_n)^{\mathrm{T}} \geqslant 0,\ k=1,2,\cdots,m-1. \end{cases} \tag{9}$$

2.2　相关属性值灵敏度分析

上述分析未考虑属性之间的相关性,但实际多属性决策问题中的某些属性之间存在一定的关联性。对此应用上述分析是片面或者错误的,属性之间的相关性可分为如下 3 种情况:

1)某一属性的增长(或减小)会引起其他若干属性的增长(或减小);

2)某一属性的增长(或减小)会引起其他若干属性的减小(或增长);

3)某一属性的增长会引起其他若干属性的增长,同时,也会引起其他若干属性的减小。

为了分析方便,假设相关属性是以同样的变动幅度 δ 增长或者减小的。假设方案 $P_i'(i=1,2,\cdots,m)$ 的属性 $I_j(j=1,2,\cdots,n)$ 对应的属性值 a_{ij}'的变动幅度为 δ_{ij},则改变后的属性值为 $a_{ij}'(1+\delta_{ij})$,与属性 $I_j(j=1,2,\cdots,n)$ 同向变化的属性 $I_p(p\neq j)$ 对应的属性值为 $a_{ip}'(1+\delta_{ij})$,与属性 $I_j(j=1,2,\cdots,n)$ 反向变化的属性 $I_q(q\neq j;q\neq p)$ 对应的属性值为 $a_{iq}'(1-\delta_{ij})$.

针对属性相关的 3 种情况,对决策结果排序矩阵 $\boldsymbol{S}=(s_{ij})_{m\times n}$的处理为:将矩阵 $\boldsymbol{S}=(s_{ij})_{m\times n}$中属性 $I_j(j=1,2,\cdots,n)$、$I_p(p\neq j)$ 和 $I_q(q\neq j;q\neq p)$ 所对应的列向量按(6)式(属性为效益型)或(7)式(属性为成本型)进行调整,其他列不变。

然后根据 $\boldsymbol{S}=(s_{ij})_{m\times n}$ 的变化对矩阵 $\boldsymbol{R}=(r_{ij})_{(m-1)\times n}$做相应的处理,依据模型(8)式和(9)式便可求出任一方案相关属性值的变动幅度,同时可得到保持原决策排序结果不变的相关属性临界值。

3　改进属性权重灵敏度分析

与属性值灵敏度分析不同的是,属性权重向量 $W=(w_1,w_2,\cdots,w_n)$ 要满足: $\sum_{j=1}^{n} w_j = 1, 0 \leqslant w_j \leqslant 1$, $j=1,2,\cdots,n$.

3.1　单一属性权重灵敏度分析

属性 $I_j(j=1,2,\cdots,n)$ 对应的属性权重 w_j 的变化量为 σ_j,则改变后的属性权重为 $w_j+\sigma_j$. 为了分析方便,保证属性权重之和为 1,本文以其他 $n-1$ 个属性权重平均减少 σ_j 的方式来得到调整后的属性权重向量:

$$\boldsymbol{W}' = (w_1', w_2', \cdots, w_j', \cdots, w_n') =$$

$$\left(w_1 - \frac{\sigma_j}{n-1}, w_2 - \frac{\sigma_j}{n-1}, \cdots, w_j + \sigma_j, \cdots w_n - \frac{\sigma_j}{n-1} \right),$$

$$j=1,2,\cdots,n. \tag{10}$$

因只探讨的是属性权重变化,故不需要对矩阵 $\boldsymbol{S}=(s_{ij})_{m\times n}$和 $\boldsymbol{R}=(r_{ij})_{(m-1)\times n}$进行调整。为保证权重向量的改变不会影响原决策排序结果,建立如下的线性规划模型:

$$\begin{cases} \max\ \sigma_j, & j=1,2,\cdots,n; \\ \text{s. t.} \begin{cases} r_k \cdot (w_1', w_2', \cdots w_n')^{\mathrm{T}} \geqslant 0, & k=1,2,\cdots,m-1, \\ 0 \leqslant w_j' \leqslant 1, & j=1,2,\cdots,n. \end{cases} \end{cases} \tag{11}$$

$$\begin{cases} \min\ \sigma_j, & j=1,2,\cdots,n; \\ \text{s. t.} \begin{cases} r_k \cdot (w_1', w_2', \cdots w_n')^{\mathrm{T}} \geqslant 0, & k=1,2,\cdots,m-1, \\ 0 \leqslant w_j' \leqslant 1, & j=1,2,\cdots,n. \end{cases} \end{cases} \tag{12}$$

根据模型(11)式和(12)式便可求出任一属性权重的变化量。进一步可得保持原决策排序结果不变的属性权重临界值。

3.2 相关属性权重灵敏度分析

假设相关的属性权重为前 $k(1<k<n)$ 个属性权重,$k(1<k<n)$ 个相关属性权重的总变化量为 σ,则每个相关属性权重的变化量为 σ/k,以其他 $n-k$ 个属性权重平均减少 σ 的方式来得到调整后的属性权重向量:

$$\boldsymbol{W}'=(w_1',w_2',\cdots,w_k',w_{k+1}',\cdots,w_n')=\left(w_1+\frac{\sigma}{n},w_2+\frac{\sigma}{n},\cdots,w_k+\frac{\sigma}{n},w_{k+1}-\frac{\sigma}{n-k},\cdots,w_n-\frac{\sigma}{n-k}\right),\quad 1<k<n. \tag{13}$$

同样不需要对矩阵 $\boldsymbol{S}=(s_{ij})_{m\times n}$ 和 $\boldsymbol{R}=(r_{ij})_{(m-1)\times n}$进行调整。为保证权重向量的改变不会影响原决策排序结果,建立如下线性规划模型:

$$\begin{cases}\max\ \sigma;\\ \text{s.t.}\begin{cases}r_k\cdot(w_1',w_2',\cdots w_n')^{\mathrm{T}}\geqslant 0, & k=1,2,\cdots,m-1,\\ 0\leqslant w_j'\leqslant 1, & j=1,2,\cdots,n.\end{cases}\end{cases} \tag{14}$$

$$\begin{cases}\min\ \sigma;\\ \text{s.t.}\begin{cases}r_k\cdot(w_1',w_2',\cdots w_n')^{\mathrm{T}}\geqslant 0, & k=1,2,\cdots,m-1,\\ 0\leqslant w_j'\leqslant 1, & j=1,2,\cdots,n.\end{cases}\end{cases} \tag{15}$$

根据模型(14)式和(15)式求出相关属性权重的变化量。进一步可得保持原决策排序结果不变的相关属性权重临界值。

4 实例分析

武器装备结构优化常用方法是对已有的几个方案进行有限元结构分析,按其分析结果择优选其一,或者是结合实际,建立设计变量、目标函数、约束条件,利用数学求极值方法求解,有限元法选择方案有限,数学微分求极值常遇到数学上的难题。实际表明本文方法在工程应用上很有效,如 20 ~40 mm 小口径火炮射速高,多联并装,瞬间形成密集弹幕,是近程防空反导有效武器,其单管射速可达 2 500 发/分钟以上。这对供弹机设计提出了非常高的要求,强度高,运动行程短,动作敏捷,故障率低,不卡壳,必须精心设计才能满足要求。

供弹机构供弹过程的协调和默契配合是一个相当复杂的循环机械运动[14]。压弹盖板在“上弹—挤弹—下弹”过程中起到很重要的作用,其中任一环节出现问题,都会导致整个供弹系统出现故障。故压弹盖板材料性能的优劣显得尤其重要。压弹盖板三维模型如图 1 所示。

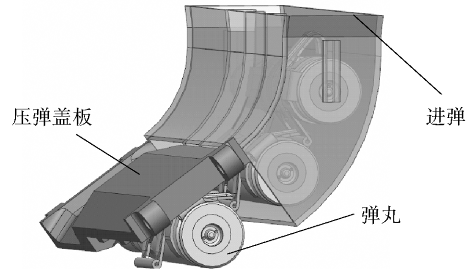

图 1 压弹盖板模型简图

Fig. 1 The model of projectile pressing plate

为了检验上述属性值和属性权重灵敏度分析的有效性,以供弹机压弹盖板材料的综合质量评价为例,现有 5 批材料作为方案集,即 $P=\{P_1,P_2,P_3,P_4,P_5\}$,对每个方案分别考虑表面质量、厚度偏差绝对值(mm)、宽度偏差(mm)、屈服强度(MPa)、抗拉强度(MPa)、伸长率(%)、塑性应变比和应变强化指数共 8 个影响材料综合质量的属性,即 $I=\{I_1,I_2,I_3,I_4,I_5,I_6,I_7,I_8\}$,其中,除厚度偏差绝对值和宽度偏差为成本型属性外,其余均为效益型属性。表面质量由专家或检验人员根据国家标准及其经验给出,其余 7 个属性值通过试验或者仪器检测的方式给出[15]。该质量评价问题的原始决策矩阵为

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}82 & 0.09 & 1.2 & 202 & 342 & 41.4 & 1.76 & 0.205\\ 66 & 0.10 & 2.8 & 188 & 280 & 39.7 & 1.69 & 0.186\\ 90 & 0.02 & 2.4 & 194 & 328 & 43.8 & 1.90 & 0.192\\ 72 & 0.07 & 1.7 & 209 & 306 & 38.2 & 1.62 & 0.198\\ 76 & 0.04 & 3.5 & 180 & 292 & 45.6 & 1.82 & 0.181\end{bmatrix}.$$

应用(1)式和(2)式对原始决策矩阵进行规范化处理得到的规范化矩阵为

$$\boldsymbol{X}=\begin{bmatrix}0.212 & 0.101 & 0.336 & 0.208 & 0.221 & 0.198 & 0.200 & 0.213\\ 0.171 & 0.091 & 0.144 & 0.193 & 0.181 & 0.190 & 0.192 & 0.193\\ 0.233 & 0.453 & 0.168 & 0.199 & 0.212 & 0.210 & 0.216 & 0.200\\ 0.187 & 0.129 & 0.237 & 0.215 & 0.198 & 0.183 & 0.184 & 0.206\\ 0.197 & 0.227 & 0.115 & 0.185 & 0.187 & 0.218 & 0.207 & 0.188\end{bmatrix}.$$

由专家根据经验赋予的属性权重向量为 $\boldsymbol{W}=(0.200,0.100,0.080,0.180,0.160,0.150,0.065,0.065)$. 由(3)式计算每个方案的综合评价值分别为 $y_1=0.209$, $y_2=0.172$, $y_3=0.234$, $y_4=0.192$, $y_5=0.193$,因此 $y_3>y_1>y_5>y_4>y_2$,方案排序为 $P_3\succ P_1\succ P_5\succ P_4\succ P_2$.

依据方案排序便可得到决策结果排序矩阵 $\boldsymbol{S}=$

$(s_{ij})_{m \times n}$，由(5)式得到 $\boldsymbol{R}$ 如下：

$$\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix} 0.021 & 0.352 & -0.168 & -0.009 & -0.009 & 0.012 & 0.016 & -0.013 \\ 0.015 & -0.126 & 0.221 & 0.023 & 0.034 & -0.020 & -0.007 & 0.025 \\ 0.010 & 0.098 & -0.122 & -0.030 & -0.011 & 0.035 & 0.023 & -0.018 \\ 0.016 & 0.038 & 0.093 & 0.022 & 0.017 & -0.007 & -0.008 & 0.013 \end{bmatrix}.$$

4.1 属性值灵敏度分析

对实例中的压弹盖板质量评价问题进行属性值灵敏度分析，在 8 个属性中，其屈服强度和抗拉强度有一定的相关性，其屈服强度越大，抗拉强度也越大。因此对这两个属性应用相关属性值灵敏度分析的方法进行分析，其余 6 个属性应用单一属性值灵敏度分析的方法进行分析，且针对属性为效益型和成本型分别对矩阵 $\boldsymbol{S}=(s_{ij})_{m \times n}$ 和 $\boldsymbol{R}=(r_{ij})_{(m-1) \times n}$ 进行调整，由模型(8)式和(9)式求得的每批压弹盖板材料的每个属性的属性值变动幅度如表 1 所示。

表 1　属性值变动幅度

Tab. 1　Changes in attribute values

压弹盖板	表面质量		厚度偏差绝对值/mm		宽度偏差/mm		屈服强度/MPa		抗拉强度/MPa		伸长率/%		塑性应变比		应变强化指数	
	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值
3	−0.483	1.464	−0.079	1.587	−0.981	0.366	−0.331	∞	−0.331	∞	−0.683	0.520	−1.296	1.952	−1.372	∞
1	−0.353	0.652	−0.277	∞	−0.640	0.155	−0.209	0.375	−0.209	0.375	−0.472	0.551	−0.973	2.108	−0.938	2.972
5	−0.013	0.432	−0.494	0.018	−0.626	0.046	−0.012	0.249	−0.012	0.249	−0.016	0.552	−0.033	1.570	−0.038	1.656
4	−0.501	0.014	−0.025	∞	−0.027	12.50	−0.277	0.012	−0.277	0.012	−0.649	0.019	−1.288	0.036	−1.170	0.036
2	−5.848	0.650	−∞	∞	−0.679	0.455	−0.554	0.332	−0.554	0.332	−4.414	0.574	−5.059	2.195	−1.516	2.317

根据表 1 中的属性值变动幅度，同时考虑到属性值允许取值范围的上限或下限，属性值允许范围参考 GB/T5213—2008[16]，得到保持方案排序不变的属性灵敏度临界值如表 2 所示。

表 2　属性值灵敏度临界值

Tab. 2　Attribute value sensitivity criterion

压弹盖板	表面质量		厚度偏差绝对值/mm		宽度偏差/mm		屈服强度/MPa		抗拉强度/MPa		伸长率/%		塑性应变比		应变强化指数	
	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值
3	46.5	100.0	0.018	0.052	0.046	3.278	129.8	210.0	270.0	350.0	38.0	66.6	1.60	5.61	0.180	∞
1	53.1	100.0	0.065	0.100	0.432	1.386	159.8	210.0	270.5	350.0	38.0	64.2	1.60	5.47	0.180	0.814
5	75.1	100.0	0.020	0.041	1.309	3.661	177.8	210.0	288.5	350.0	44.9	70.8	1.76	4.68	0.180	0.481
4	35.9	73.0	0.068	0.100	1.654	4.000	151.1	210.0	270.0	309.7	38.0	38.9	1.60	1.68	0.180	0.205
2	0	100.0	0	0.100	0.899	4.000	83.8	210.0	270.0	350.0	38.0	62.5	1.60	5.40	0.180	0.617

对表 2 中的数据进行分析可知，在维持原排序结果不变的前提下：压弹盖板 2 的表面质量、厚度偏差绝对值以及抗拉强度 3 个属性无论如何变化（在实际允许范围内）均对原排序无任何影响，可见其综合质量很差，不能靠这 3 个属性的优化而提升其综合质量；对于屈服强度属性，5 批盖板材料均可取到实际允许的最大值 210 MPa，这说明对于排在后面的盖板要想提升综合质量，单靠提高屈服强度的措施是做不到的；同时，还可根据每批盖板材料属性的属性值变动幅度大小来得到其最灵敏属性，属性值的变动幅度越小，说明该属性越灵敏，其细微的变化都可能引起排序结果的改变，因此需对该类属性格外关注，反之，则说明属性不灵敏，其属性值的变化对该批压弹盖板材料综合质量的改变没有太大的影响。

4.2 属性权重灵敏度分析

对实例中的压弹盖板材料质量评价问题进行属性权重灵敏度分析，与属性值灵敏度分析类似，对屈服强度和抗拉强度这两个属性权重应用相关属性权重灵敏度分析的方法进行分析，其余 6 个属性权重

应用单一属性权重灵敏度分析的方法进行分析。由模型(11)式和(12)式、(14)式和(15)式求得每个属性的属性权重变化量如表3所示。

根据表3中的权重变化量,可得到属性权重的灵敏度临界值和稳定区间的大小,如表4和表5所示。

表3 属性权重变化

Tab.3 Changes in attribute weights

属性	表面质量		厚度偏差绝对值/mm		宽度偏差/mm		屈服强度/MPa		抗拉强度/MPa		伸长率/%		塑性应变比		应变强化指数	
	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值
权重变化量	-0.034	0.455	-0.004	0.094	-0.069	0.003	-0.160	0.009	-0.160	0.009	-0.011	0.341	-0.016	0.501	-0.065	0.025

表4 属性权重灵敏度临界值

Tab.4 Attribute weight sensitivity criterion

属性	表面质量		厚度偏差绝对值/mm		宽度偏差/mm		屈服强度/MPa		抗拉强度/MPa		伸长率/%		塑性应变比		应变强化指数	
	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值
权重变化量	0.166	0.655	0.096	0.194	0.011	0.083	0.020	0.189	0	0.169	0.139	0.491	0.049	0.566	0	0.090

表5 属性权重稳定区间

Tab.5 Attribute weight stable interval

属性	表面质量	厚度偏差绝对值/mm	宽度偏差/mm	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%	塑性应变比	应变强化指数
权重变化量	0.489	0.098	0.072	0.169	0.169	0.352	0.517	0.090

对表5中的数据进行分析可知:在维持原排序结果不变的前提下,塑性应变比、表面质量以及伸长率的权重变化范围较大,说明这3个属性权重相对于原方案排序是不灵敏的;而剩下的5个属性权重变化范围相对较小,说明其对原方案排序灵敏,5个参数按灵敏度排序为宽度偏差>应变强化指数>厚度偏差>屈服强度=抗拉强度。对于灵敏的属性权重,说明其对应的属性值的细微变化很容易引起排序结果的改变,因此在选取时对于灵敏的属性权重谨慎一些,确保原排序结果不变。

5 结论

多属性决策灵敏度分析,大多数是逐一对指标的属性进行分析,当相关属性权重改变,要对相应的属性权重向量进行平均修正,并求出权重改变量的极值,对决策矩阵进行了修正,完成了多属性决策灵敏度分析。

压弹盖板设计中取8个设计参数,作为指标进行相关多属性灵敏度分析,其中塑形应变比、表面质量和伸长率3个参数不灵敏,即可以按实际需求在较大范围内取值,对压弹盖板性能影响不大;而其余5个参数按灵敏度排序:宽度偏差>应变强化指数>厚度偏差>屈服强度=抗拉强度。这为结构设计和选用材料提供有益参考。

参考文献(References)

[1] Mendoza G A, Martin H. Multi-criteria decision analysis in natural resource management: a critical review of methods and new modeling paradigms[J]. Forest Ecology and Management, 2006, 230(1/2/3):1-22.

[2] 万树平.供应商选择的多属性群决策方法[J].计算机工程与应用,2009, 45(8):198-199,203.
WAN Shu-ping. Method of multi-attribute group decision making for supplier selection[J]. Computer Engineering and Applications, 2009,45(8):198-199,203. (in Chinese)

[3] Sivapirakasam S P, Surianarayanan M J. Multi attribute decision making for green electrical discharge machining[J]. Expert System with Applications, 2011,38(7):8370-8374.

[4] 双海军,孟卫东.供应商能力有约束的混合型多属性决策方法[J].控制与决策,2011, 26(1):17-21.
SHUANG Hai-jun, MENG Wei-dong. Hybrid multi-attribute decision-making research based on vendor's capacity constraint[J]. Control and Decision,2011, 26(1):17-21. (in Chinese)

[5] 马存宝,张彦辉,史浩山,等.基于模糊多属性评判方法的因果

强度求解算法[J]. 仪器仪表学报,2009, 30(2):257 -260.

MA Cun-bao, ZHANG Yan-hui, SHI Hao-shan. Causal strength solving algorithm based on fuzzy multi attribute evaluation method [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument , 2009, 30(2):257 -260. (in Chinese)

[6] Starr M K. A discussion of some normative criteria for decision making under uncertainty [J]. Industrial Management Review, 1966,8(1):71 -78.

[7] Evans J R. Sensitivity analysis in decision theory [J]. Decision Science,1984,15(2):239 -247.

[8] Insua D R, French S. A framework for sensitivity analysis in discrete multi-objective decision-making[J]. European Journal of Operation Research, 1991,54(2):176 -190.

[9] Traintaphyllou E, Sabchez A. A sensitivity analysis approach for some deterministic multi criteria decision making methods[J]. Decision Science,1997,28(1):151 -187.

[10] Armacost R L, Hosseini J C. Identification of determinant attributes using the analytic hierarchy process[J]. Journal of the Academy of Making Science,1994,22(4):383 -392.

[11] 吴超,胡昆. 区间数多属性决策中权重灵敏度分析[J]. 系统工程与电子技术,2004,26(9):1217 -1218.

WU Chao, HU Kun. Sensitivity analysis to weight of priorities in multiple attribute decision making with intervals[J]. Systems Engineering and Electronics, 2004, 26(9):1217 -1218. (in Chinese)

[12] 樊治平,李洪燕,姜艳萍. 基于 OWA 算子的群决策方法的灵敏度分析[J]. 东北大学学报:自然科学版,2004,25(11):1114 -1117.

FAN Zhi-ping, LI Hong-yan, JIANG Yan-ping. Sensitivity analysis of group decision making method based on OWA operators [J]. Journal of Northeastern University:Natural Science, 2004, 25(11):1114 -1117. (in Chinese)

[13] Hwang C L, Yoon K. Multiple attribute decision making: methods and applications [M]. Berlin: Springer-Verlag,1981:20 -25.

[14] 梁世瑞. 自动机创新学引论[M]. 北京:国防工业出版社, 2007:173 -182.

LIANG Shi-rui. Innovation introduction of automata[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007:173 -182.

[15] 董德威,颜云辉. 带钢质量评价的属性权重灵敏度分析[J]. 组合机床与自动化加工技术,2012,7(7):11 -17.

DONG De-wei, YAN Yun-hui. Sensitivity analysis on attribute weight of strip steel quality evaluation[J]. Modular Machine Tool and Automatic Manufacturing Technique, 2012,7(7):11 -17. (in Chinese)

[16] GB/T 5213—2008 冷轧低碳钢板及钢带[S]. 北京:中国标准出版社,2009.

GB/T 5213—2008 Cold rolling low carbon steel and strip[S]. Beijing:China Standards Press,2009. (in Chinese)