

基于区间数的预警机作战效能评估

郭 辉, 徐浩军, 刘 凌

(空军工程大学工程学院, 陕西 西安 710038)

摘 要: 建立了预警机作战效能评估的指标体系, 提出了区间数的幂运算法则。采用区间数特征向量法确定了指标体系中定性指标的权重, 采用区间数特征向量法和信息熵法相结合的组合赋权法确定了指标体系中定量指标的权重。给出了指标体系中定量指标和定性指标的规范化方法, 提出了用区间数形式的加权和与加权积关系进行指标聚合的方法。最后通过算例对该方法的有效性进行了检验。

关键词: 预警机; 作战效能; 区间数; 特征向量法; 信息熵法

中图分类号: V 271.4; O 212.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-506X.2010.05.027

Measurement of combat effectiveness of early-warning aircraft based on interval number

GUO Hui, XU Hao-jun, LIU Ling

(The Engineering Inst., Air Force Engineering Univ., Xi'an 710038, China)

Abstract: The criterion system of evaluation of combat measurement for an early-warning aircraft is built, and then the exponential algorithm for the interval number is put forward. The weights of qualitative indexes are ascertained by adopting the interval eigenvector method, and the weights of quantitative indexes are ascertained by adopting the interval-number eigenvector method and information entropy method. Then the standardization methods of qualitative indexes and quantitative indexes are presented, and a method of index aggregation based on the relationship of weight summation and product with the form of the interval number is proposed. Finally, the validity of this method is verified by an example.

Keywords: early-warning aircraft; combat effectiveness; interval number; eigenvector method; information entropy method

0 引 言

从几次局部战争中可以看出, 预警机在现代体系对体系的战争中起到了巨大的作用, 缺乏预警机的一方将处于不利的地位。21 世纪的预警机已超越了“千里眼”的范畴, 它集侦察、指挥、控制、引导、通信、制导和遥控于一身, 已经成为名副其实的“空中指挥堡垒”。预警机的效能如何评估以及它对体系的作用有多大是目前亟待解决的问题。目前, 有关预警机作战效能评估问题的研究鲜见报道, 朱宝镗等人利用解析法模型对预警机的作战效能进行了探索性的研究^[1]。由于有关预警机的相关资料是各国保密的重点, 因此所能得到的一些数据带有一定的不确定性和模糊性, 并且作战效能评估本身就具有概略性。在处理实际问题时, 决策者往往很难给出准确的决策信息, 但往往容易给出决策信息的上界和下界, 即容易给出用区间数表示的决

策信息^[2]。基于用区间数来表达模糊判断是合理的且易被决策者接受的特点, 本文尝试采用区间数多属性决策对预警机的作战效能评估问题进行研究。

1 区间数及其运算

令 $\tilde{a} = [a^L, a^U] = \{x \mid a^L \leq x \leq a^U, a^L, a^U \in R\}$ 表示实数轴上的一个闭区间, 则 \tilde{a} 为一个区间数。如果 $\tilde{a} = \{x \mid 0 \leq a^L \leq x \leq a^U\}$, 称 \tilde{a} 为正区间数。若 $a^L = a^U$, 则 \tilde{a} 退化为一个实数。令 $\tilde{a} = [a^L, a^U]$, $\tilde{b} = [b^L, b^U]$, $k \geq 0$, 区间数的运算法则如下^[3]:

- (1) 加法 $\tilde{a} + \tilde{b} = [a^L + b^L, a^U + b^U]$;
- (2) 减法 $\tilde{a} - \tilde{b} = [a^L - b^U, a^U - b^L]$;
- (3) 数乘 $k\tilde{a} = [ka^L, ka^U]$;
- (4) 乘法 $\tilde{a}\tilde{b} = [\min\{a^Lb^L, a^Lb^U, a^Ub^L, a^Ub^U\}, \max\{a^Lb^L, a^Lb^U, a^Ub^L, a^Ub^U\}]$;

收稿日期: 2008-10-16; 修回日期: 2009-02-10。

基金项目: 国家自然科学基金(70671106)资助课题

作者简介: 郭辉(1981-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为飞行器作战效能与仿真技术。E-mail: guohui731506@163.com

$$(5) \text{ 除法 } \frac{\tilde{a}}{\tilde{b}} = [a^L, a^U] \left[\frac{1}{b^U}, \frac{1}{b^L} \right].$$

为了计算的需要,根据实数幂运算的规则和区间数的性质,在此提出一种底数和指数均为区间数的幂运算,运算法则如下

$$\tilde{a}^{\tilde{b}} = [\min \{ (a^L)^{b^L}, (a^L)^{b^U}, (a^U)^{b^L}, (a^U)^{b^U} \}, \max \{ (a^L)^{b^L}, (a^L)^{b^U}, (a^U)^{b^L}, (a^U)^{b^U} \}]$$

2 效能评估指标体系的建立

建立效能评估指标体系是进行效能评估的前提,影响预警机作战效能的因素很多,本文选取飞机性能、通信数据传输交联能力、探测引导能力、电子侦察和通信侦察能力、导航定位能力和电子对抗能力这六个因素作为预警机作战效能的指标^[1]。其中的飞机性能由最大巡航时间、巡航速度、再次出动准备时间和对机场要求程度来确定;通信数据传输交联能力由通信能力和数据传输能力来确定,其中通信能力由空空通信能力、空地通信能力和空海通信能力来确定,数据传输能力由实时性、准确性和可靠性来确定;探测引导能力由雷达最大探测距离、雷达搜索总方位角、雷达体制、可同时跟踪目标数和可同时引导作战飞机数来确定;电子侦察和通信侦察能力由电子侦察能力和通信侦察能力来确定,电子侦察能力由电子情报侦察能力、电子支援侦察能力和威胁告警能力来确定,通信侦察能力由目标参数测量和识别能力、目标发现能力和目标测向和定位能力来确定;导航定位能力由精度和可靠性来确定;电子对抗能力由电子对抗侦察能力、电子干扰能力和电子防御能力来确定。综上所述,可以得到如图 1 所示的预警机作战效能评估指标体系。

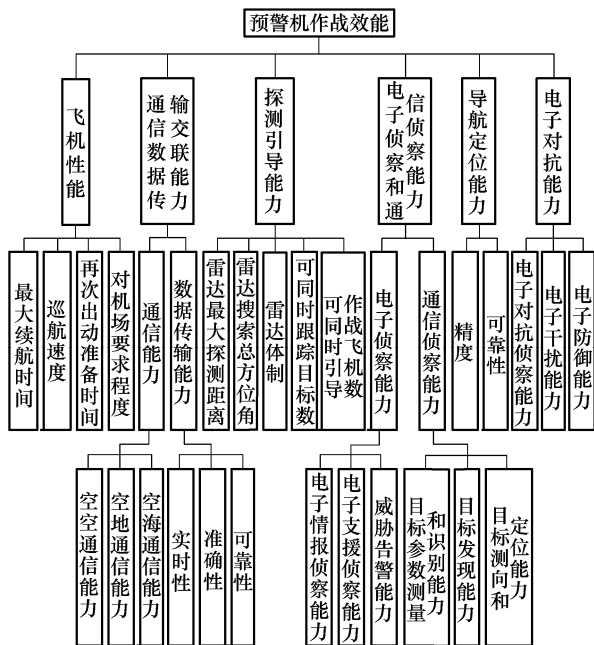


图 1 预警机作战效能评估指标体系

3 指标的规范化与聚合

3.1 指标的规范化

指标规范化是把意义或者量纲各异的指标值通过一定的数学变换,转化为可以进行指标聚合的“评分值”,即去量纲化。指标包括定量指标和定性指标,定量指标又分为效益型、成本型、固定型、区间型、偏离型和偏离区间型 6 类。在此仅以效益型指标为例,介绍定量指标的规范化方法。所谓效益型指标是指该型指标值越大越好,如巡航速度、雷达最大探测距离等。它又可分为直线递增型、上凸递增型、下凸递增型和“S”形递增型,4 种类型的规范化函数的具体表达式详见文献[3]。定性指标也叫模糊性指标,通过专家打分可以将模糊性指标转化为确定指标,这种方法在实践中经常被采用。对于复杂系统,专家可以采用模糊语言定性描述一些指标,如电子对抗能力下的电子干扰能力这个指标。通常我们习惯于用“好”、“一般”和“差”等来定性度量,本文选取“低”、“较低”、“中”、“较高”和“高”来度量各指标的能力高低,它们映射到[0,1]之间的区间数分别为[0,0.2]、[0.2,0.4]、[0.4,0.6]、[0.6,0.8]和[0.8,1.0]。

3.2 指标的聚合

下层指标向上层指标进行聚合时,一般采用加权和与加权积两种方法处理聚合关系。加权和关系可以形象地用“或”关系来描述,即下层效能指标以不同的权重合作(互补)聚合到上层效能指标;加权积关系又称为幂函数法,可以形象地用“与”关系来描述,即对于上层效能指标而言,每个下层效能指标的权重虽然不同,但都是不可缺少的,只要一个下层效能指标为零,都会导致上层效能指标为零。经分析,预警机作战效能评估指标体系中只有通信数据传输交联能力、导航定位能力和数据传输能力下各指标的聚合关系为加权积关系,其他各层次指标的聚合关系为加权和关系。在定量指标的加权和与加权积的基础上,不难得出如式(1)和式(2)所示的指标值和权重均为区间数形式的加权和与加权积关系的函数表达式。

$$\tilde{e}_i = \tilde{\omega}_1 \tilde{e}_{i1} + \tilde{\omega}_2 \tilde{e}_{i2} + \dots + \tilde{\omega}_n \tilde{e}_{in} \quad (1)$$

$$\tilde{e}_i = \tilde{e}_{i1} \tilde{e}_{i2} \dots \tilde{e}_{in} \quad (2)$$

式中, \tilde{e}_i 表示上层效能指标值; \tilde{e}_{ik} ($k = 1, 2, \dots, n$) 为下层效能指标值; $\tilde{\omega}_k$ ($k = 1, 2, \dots, n$) 为下层指标的权重。

4 权重的处理与确定

在效能评估中,权重确定的是否合理直接影响到评估结果的正确性。目前,权重的确定方法大体可分为两类^[4-5]:主观赋权法和客观赋权法。主观赋权法是基于决策者给出的主观偏好信息或决策者直接根据经验给出属性权重的,如专家调查法、二项系数法、特征向量法等。客观赋权法是利用客观信息计算出权重的,例如离差最大化法、信息熵法、多目标最优化方法等。两类方法各有优缺点,在实际使用中,常将两种方法相结合来确定权重。本文确定权重的思路为:指标为定性指标时,利用区间数特征向量法来确定权重;指标为定量指标时,利用区间数特征向量法和信

息熵法相结合的方法来确定权重。下面将首先简要介绍区间数特征向量法和信息熵法,在此基础上来确定预警机作战效能指标体系中各层次指标的权重。

4.1 区间数特征向量法

区间数特征向量法是特征向量法在区间数上的扩展。

设 $\tilde{A} = (\tilde{a}_{ij})_{n \times n}$ 为区间数矩阵,即 $\tilde{a}_{ij} = [a_{ij}^L, a_{ij}^U]$ 。记 $A^L = (a_{ij}^L)_{n \times n}$, $A^U = (a_{ij}^U)_{n \times n}$, 并记 $\tilde{A} = [A^L, A^U]$ 。同样对区间数向量 $\tilde{x} = (\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_n)^T$, 即 $\tilde{x}_i = [x_i^L, x_i^U]$, 记 $x^L = (x_1^L, x_2^L, \dots, x_n^L)^T$, $x^U = (x_1^U, x_2^U, \dots, x_n^U)^T$, 并记 $\tilde{x} = [x^L, x^U]$ 。对于给定的区间数判断矩阵 $\tilde{A} = [A^L, A^U]$, 区间数特征向量法确定权重的计算步骤如下^[6]:

步骤 1 利用特征向量法分别求 A^L 、 A^U 的最大特征值所对应的具有正分量的归一化特征向量 x^L 、 x^U 。

步骤 2 由 $A^L = (a_{ij}^L)_{n \times n}$, $A^U = (a_{ij}^U)_{n \times n}$, 按式(3)计算 α 和 β 。

$$\alpha = \left[\frac{\sum_{j=1}^n \frac{1}{\sum_{i=1}^n a_{ij}^U}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\sum_{j=1}^n a_{ij}^L}} \right]^{1/2}, \beta = \left[\frac{\sum_{j=1}^n \frac{1}{\sum_{i=1}^n a_{ij}^L}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\sum_{j=1}^n a_{ij}^U}} \right]^{1/2} \quad (3)$$

步骤 3 权重向量 $\tilde{\omega} = [\alpha x^L, \beta x^U]$ 。

4.2 信息熵法

熵这个概念来源于热力学。1948 年,信息论的创始人申农首次引进信息熵来描述信号源信号的不确定性。在信息论中,信息熵是系统无序程度的度量。某个评价指标的信息熵越小,表明指标值的变异程度越大,提供的信息量越大,在综合评价中所起的作用也越大,即指标的权重也越大。因此,可以根据各个指标的变异程度,利用信息熵这一工具,计算各指标的权重。信息熵法确定权重的步骤如下^[7-8]:

步骤 1 对于某一多属性决策问题,设 N 为方案个数, M 为属性个数。构造决策矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times m}$, 并利用适当的方法把它规范化为 $R = (r_{ij})_{n \times m}$ 。

步骤 2 计算矩阵 $R = (r_{ij})_{n \times m}$, 得到列归一化矩阵 $D = (d_{ij})_{n \times m}$, 其中

$$d_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^n r_{ij}}, i \in N; j \in M \quad (4)$$

步骤 3 计算属性 u_j 输出的信息熵

$$E_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n d_{ij} \ln d_{ij}, j \in M \quad (5)$$

当 $d_{ij} = 0$ 时,规定 $d_{ij} \ln d_{ij} = 0$ 。

步骤 4 计算属性权重向量 $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m)$, 其中

$$\omega_j = \frac{1 - E_j}{\sum_{k=1}^m (1 - E_k)}, j \in M \quad (6)$$

4.3 权重的确定

在预警机作战效能评估指标体系中,飞机性能和探测引导能力两项指标下的指标(属性)为定量指标,因此采用区间数特征向量法和信息熵法相结合的方法来确定各指标

的权重。其他各层次的指标均为定性指标,因此采用区间特征向量法来确定各指标的权重。下面以探测引导能力下的各指标为例来说明权重的确定。通过征求专家意见,得到探测引导能力下各指标的区间数判断矩阵,如表 1 所示。表 1 中的 u_{31} 、 u_{32} 、 u_{33} 、 u_{34} 和 u_{35} 分别表示探测引导能力下各指标判断的区间数。

表 1 探测引导能力下各指标的区间数判断矩阵

	u_{31}	u_{32}	u_{33}	u_{34}	u_{35}
u_{31}	[1, 1]	[3, 5]	[5, 7]	[2, 4]	[1, 3]
u_{32}	[1/5, 1/3]	[1, 1]	[3, 5]	[1/5, 1/3]	[1/6, 1/4]
u_{33}	[1/7, 1/5]	[1/5, 1/3]	[1, 1]	[1/6, 1/4]	[1/7, 1/5]
u_{34}	[1/4, 1/2]	[3, 5]	[4, 6]	[1, 1]	[1/4, 1/2]
u_{35}	[1/3, 1]	[4, 6]	[5, 7]	[2, 4]	[1, 1]

按照区间数特征向量法的计算步骤可求得

$$\alpha = 0.8557, \beta = 1.1140$$

$$x^L = [0.36, 0.09, 0.04, 0.19, 0.32]^T$$

$$x^U = [0.40, 0.08, 0.04, 0.17, 0.32]^T$$

于是得到区间数权重向量

$$\tilde{\omega}_1 = ([0.38, 0.44], [0.11, 0.11],$$

$$[0.04, 0.04], [0.21, 0.23], [0.20, 0.23])$$

现有 4 个方案 E-3F、E-2C、A-50 和 Falcon, 它们在探测引导能力下各指标的属性值即决策矩阵如表 2 所示。

表 2 决策矩阵

	u_{31}	u_{32}	u_{33}	u_{34}	u_{35}
E-3F	480	360	0.9	250	18
E-2C	400	360	0.8	200	15
A-50	360	360	0.9	150	14
Falcon	670	260	1.0	180	20

各指标经规范化处理后的规范化矩阵如矩阵 R 所示,进一步可以得到如矩阵 D 所示的归一化矩阵。

$$R = \begin{bmatrix} 0.72 & 1.00 & 0.90 & 1.00 & 0.90 \\ 0.60 & 1.00 & 0.80 & 0.80 & 0.75 \\ 0.54 & 1.00 & 0.90 & 0.60 & 0.70 \\ 1.00 & 0.72 & 1.00 & 0.72 & 1.00 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} 0.25 & 0.27 & 0.25 & 0.32 & 0.27 \\ 0.21 & 0.27 & 0.22 & 0.26 & 0.22 \\ 0.19 & 0.27 & 0.25 & 0.19 & 0.21 \\ 0.35 & 0.19 & 0.28 & 0.23 & 0.30 \end{bmatrix}$$

按照信息熵法的计算步骤可求得

$$E_1 = 0.9785, E_2 = 0.9936, E_3 = 0.9978,$$

$$E_4 = 0.9876, E_5 = 0.9927$$

进一步可求得各指标的信息熵权 $\omega_2 = (0.43, 0.13, 0.04, 0.25, 0.15)$ 。主观权重与客观权重相结合的方式有多种,本文采用目前应用较为广泛的一种组合赋权法即 $\tilde{\omega} = \lambda \tilde{\omega}_1 + (1 - \lambda) \omega_2$, 且 $0 \leq \lambda \leq 1$ 。其中的 λ 为权衡系数,反映了决策者对主、客观权重的偏好程度。根据所获取数据的完整性和可信度以及对专家的信任程度,本文取 $\lambda = 0.6$ 。 λ 越大,表示主观权重对综合权重的影响越大。

按照上述的组合赋权法,计算得到探测引导能力下各指标的区间数权重分别为

$$\omega_{31} = [0.38, 0.44], \omega_{32} = [0.11, 0.11]$$

$\omega_{33} = [0.04, 0.04], \omega_{34} = [0.21, 0.23], \omega_{35} = [0.20, 0.23]$
同理可以得到如表 3 所示的效能指标体系中其他各层次指标的区间数权重。

表 3 指标体系中各层次指标的区间数权重

ω_1	ω_2	ω_3	ω_4	ω_5	ω_6	ω_{11}	ω_{12}	ω_{13}
[0.06,0.07]	[0.19,0.22]	[0.35,0.41]	[0.12,0.19]	[0.1,0.13]	[0.06,0.07]	[0.42,0.46]	[0.21,0.23]	[0.29,0.29]
ω_{14}	ω_{21}	ω_{22}	ω_{31}	ω_{32}	ω_{33}	ω_{34}	ω_{35}	ω_{41}
[0.04,0.05]	[0.69,0.79]	[0.24,0.28]	[0.38,0.44]	[0.11,0.11]	[0.04,0.04]	[0.21,0.23]	[0.20,0.23]	[0.38,0.45]
ω_{42}	ω_{51}	ω_{52}	ω_{61}	ω_{62}	ω_{63}	ω_{211}	ω_{212}	ω_{213}
[0.53,0.63]	[0.68,0.74]	[0.28,0.30]	[0.28,0.33]	[0.39,0.49]	[0.25,0.27]	[0.54,0.69]	[0.23,0.24]	[0.14,0.16]
ω_{221}	ω_{222}	ω_{223}	ω_{411}	ω_{412}	ω_{413}	ω_{421}	ω_{422}	ω_{423}
[0.38,0.48]	[0.29,0.39]	[0.18,0.27]	[0.44,0.51]	[0.27,0.36]	[0.19,0.23]	[0.27,0.36]	[0.44,0.51]	[0.19,0.23]

5 算例

已知 E-3F 预警机的飞机性能和探测引导能力下各指标的初始值和规范值如表 4 所示^[1]。其中最大续航时间和巡航速度为上凸递增型指标,它们的边界分别设定为(2,15)和(200,900);再次出动准备时间为上凸递减型指标,它的边界设定为(2,6);雷达最大探测距离、可同时跟踪目标数和可同时引导作战飞机数为下凸递增型指标,它们的边界分别设定为(200,500)、(50,200)和(6,20);雷达搜索总方位角为直线递增型指标,它的边界设定为(0,360)。以上各指标边界值的确定均是通过征求专家意见得出的。对机场要求程度和雷达体制分别取为 0.8 和 0.9。

通过征求专家意见,对效能指标体系中的定性指标进行评价,所得的各指标的语言评价价值如表 5 所示。然后按照前面介绍的定性指标的规范化方法将各个指标的语言评价价值分别映射为[0,1]之间的区间数。根据前面介绍的指标聚合方法,计算得到各指标的区间数形式的效能指标值为: $\tilde{e}_1 = [0.92, 0.98], \tilde{e}_{21} = [0.63, 0.98], \tilde{e}_{22} = [0.63, 0.88], \tilde{e}_2 = [0.61, 0.96], \tilde{e}_3 = [0.85, 0.95], \tilde{e}_{41} = [0.45, 0.78], \tilde{e}_{42} = [0.49, 0.82], \tilde{e}_4 = [0.43, 0.87], \tilde{e}_5 = [0.73, 0.94], \tilde{e}_6 = [0.50, 0.81]$ 。进一步聚合便可以得到该型预警机作战效能的区间型效能值为 $\tilde{e} = [0.62, 1.0]$, 然后去模糊化,取区间数的中间值得该型预警机作战效能的效能值为 $e = 0.81$ 。这说明该型预警机的作战效能介于“较高”和“高”之间,这个结论与实际情况和用对数法得到的结论相一致。当权衡系数 λ 分别取 0.4 和 0.8 时,经计算得效能值 e 均等于 0.815,这说明 λ 的变化对评估结果影响不大。

表 4 飞机性能和探测引导能力下各指标的初始值和规范值

指标	u_{11}	u_{12}	u_{13}	u_{14}	u_{31}	u_{32}	u_{33}	u_{34}	u_{35}
初始值	13	850	3	0.8	480	360	0.9	250	18
规范值	0.97	0.99	0.92	0.8	0.90	1.0	0.9	1.0	0.78

表 5 效能指标体系中定性指标的语言评价价值

指标	u_{51}	u_{52}	u_{61}	u_{62}	u_{63}	u_{211}	u_{212}	u_{213}	u_{221}
评价价值	高	较高	中	较高	较高	高	较高	中	较高
指标	u_{222}	u_{223}	u_{411}	u_{412}	u_{413}	u_{421}	u_{422}	u_{423}	
评价价值	高	较高	中	较高	较高	较高	中	高	

6 结论

对预警机的作战效能评估问题进行研究,有利于更好的

认识预警机在作战体系中的地位和作用,为提高预警机的作战效能和作战体系的优化提供定量依据。本文在建立了预警机作战效能评估指标体系的基础上,确定了效能指标体系中定量指标的规范化方法以及定性指标与区间数之间的映射关系。对效能指标体系中不同类型的指标分别采用区间数形式的加权和与加权积关系进行聚合,然后应用特征向量法和信息熵法以探测引导能力下的指标为例确定了效能指标体系中各个指标的区间数权重。算例的结果表明用区间数方法对预警机的作战效能进行评估是可行的、有效的。

参考文献:

- [1] 朱宝鏊, 朱荣昌, 熊笑非. 作战飞机效能评估[M]. 北京: 航空工业出版社, 2006.
- [2] 宋业新, 尹迪, 张建军. 一种新的区间数多属性决策的集结方法[J]. 系统工程与电子技术, 2004, 26(8):1060-1062. (Song Yexin, Yin Di, Zhang Jianjun. New aggregate method for multiple attribute decision-making with intervals [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2004, 26(8):1060-1062.)
- [3] 徐玖平, 吴巍. 多属性决策的理论与方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [4] 谭旭, 高妍方, 陈英武. 区间型多属性决策求解新方法[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(7):1082-1085. (Tan Xu, Gao Yanfang, Chen Yingwu. New method for solving interval multi-attribute decision-making problem [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2007, 29(7):1082-1085.)
- [5] 吴坚, 梁昌勇, 李文年. 基于主观与客观集成的属性权重求解方法[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(3):383-387. (Wu Jian, Liang Changyong, Li Wennian. Method to determine attribute weights based on subjective and objective integrated [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2007, 29(3):383-387.)
- [6] 肖峻, 王成山, 罗凤章. 区间层次分析法的权重求解方法初探[J]. 系统工程与电子技术, 2004, 26(11):1597-1600. (Xiao Jun, Wang Chengshan, Luo Fengzhang. Exploration on the methods of weight calculation in the interval-based AHP [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2004, 26(11):1597-1600.)
- [7] 陈伟, 夏建华. 综合主、客观权重信息的最优组合赋权方法[J]. 数学的实践与认识, 2007, 37(1):17-23.
- [8] 彭金栓, 邵毅明, 彭丽芳. 基于熵权的公交满意度模糊综合评价[J]. 山西建筑, 2007, 33(36):15-16.