

## 基于综合赋权 C-TOPSIS 法的 航天器研制风险控制

张志峰<sup>1</sup>, 白焱<sup>2</sup>

(1. 西北工业大学 航天学院, 陕西 西安 710072; 2. 空军工程大学 防空反导学院, 陕西 西安 710051)

**摘 要:** 通过对航天器研制风险评估指标的分析, 建立基于综合赋权的逼近理想点法(TOPSIS)的风险控制模型. 运用层次分析法(AHP)求得主观权重, 熵值赋权法获得客观权重, 再通过线性规划的方法求出综合权重; 用“垂面射影法”替代现有相对欧式距离对 TOPSIS 法进行优化, 提高了评估精度; 对风险评价指标进行分类处理, 建立分层评价指标体系, 简化了运算过程. 最后结合航天器研制风险控制实例, 选出了较为优化的技术方案, 证明了该方法的可行性.

**关 键 词:** 航天器研制; C-TOPSIS; 分类; 熵权法; 风险控制

**中图分类号:** V 57      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-3026(2015)05-0626-05

## Risk Control of the Spacecraft Development Based on Comprehensive Weight C-TOPSIS

ZHANG Zhi-feng<sup>1</sup>, BAI Yan<sup>2</sup>

(1. School of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. Missile Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China. Corresponding author: BAI Yan, E-mail: 380287428@qq.com)

**Abstract:** By analyzing the risk of the spacecraft developing evaluation index, a risk control model was built based on comprehensive weight TOPSIS. In this model, the subject and the object weight were calculated by AHP and entropy-weight method. The linear programming was used to count the comprehensive weight. And TOPSIS method was optimized by using “vertical plane projection method” to substitute existing opposite continental distance, resulting in improving the precision of evaluate. The risk evaluated target was clustered, and the different sort target system was set up, resulting in predigesting the process of the operation. In the end, the best scheme was selected by combining the example of spacecraft development control. The result showed the feasibility of the developed method.

**Key words:** spacecraft development; C-TOPSIS; clustering; entropy power process; risk control

航天器的开发和研制, 由于常常采用未经空间验证的新技术、新材料、新工艺, 因此具有较高的固有风险. 美国国家航空航天局(NASA)在1998年发布的《NASA项目管理过程和要求》文件中, 对项目风险控制提出了详细的要求, 规定了实施风险管理工作的内容和要求. 美国国防部要求型号研制方必须进行风险控制, 提供风险评估结果, 以便为管理部门提供决策依据<sup>[1]</sup>. 迟宝山

等<sup>[2]</sup>引入不确定理论中的三角模糊模型来量化技术风险的后果类信息, 并归纳了如何建立三角模糊模型的准则. 陈建中等<sup>[3]</sup>建立了一种多轮交互逐步逼近满意解的多属性群体决策的综合方法, 对决策方案采用扩展的TOPSIS(technique for order preference by similarity to idea solution)法进行定性的评价排序. 以上文献并没有同时考虑权重的主客观因素, 对评估的方式也没有加以分类.

本文将 TOPSIS 法进行优化改进,将研究目标锁定在综合权重的选取和确定,并对评价指标体系加以分类,建立递阶层次结构,不仅简化了航天器研制的风险评价方法,而且提高了评估结果的可靠性,为决策者提供了有效的评价手段和方法。

1 航天器研制风险指标模型的建立

1.1 航天器研制的特点分析

航天器的研制不同于其他武器装备,航天器工作在特殊空间,工作环境十分严酷,一旦发生故障,无法返回维修,会造成科学研究、经济、军事乃至政治上不可挽回的损失. 因此,不论是航天器型号管理部门,还是设计和生产部门都力求对航天器研制风险可以做到最高标准的控制,以保证已知的和未知的风险不致发展成为航天器型号研制费用、进度产生重大影响的问题,或导致航天器研制的失败。

1.2 航天器风险评价模型及等级划分

针对航天器的研制特点,将风险主要划分为技术风险、费用风险、性能风险和管理风险,因此,在深入调查论证的基础上,综合分析建立如图 1 所示的控制指标模型。

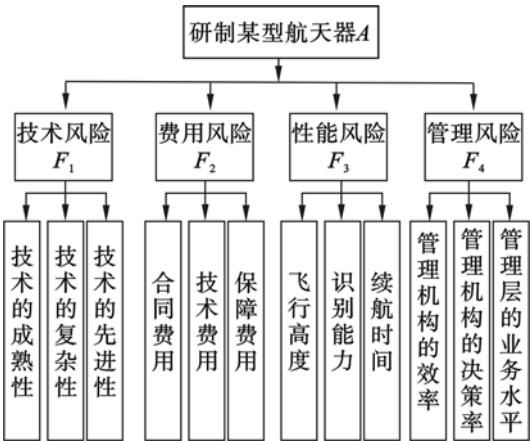


图 1 航天器研制风险控制模型  
Fig. 1 The model of risk control for spacecraft

结合相关文献和分析历次航天器研制试验数据基础上,总结了 12 个风险评价指标的风险等级,等级划分如表 1 所示。

2 综合赋权法及权重的选取

本文采用 AHP 法<sup>[4-5]</sup>获得主观指标权重,采用熵值法获得客观权重,并在此基础上,引入综合赋权法,求得综合权重,与单纯的主客观赋权法相比,综合赋权法能够兼顾主客观影响因素,得出更

为科学合理的计算结果<sup>[6]</sup>。

2.1 数据标准化处理

首先对图 1 风险评估模型列出的指标进行专家打分,得到初始化矩阵  $X = \{x_{ij}\}$ ,其中  $i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n$ ,  $m$  是评价方案的个数, $n$  是评价的指标数. 由于研制风险要求越小越好,因此属于成本型风险,再用功效系数法将数据进行标准化处理,公式为<sup>[7]</sup>

$$y_{ij} = \frac{\max x_j - x_{ij}}{\max x_j - \min x_j} \times t + (1 - t) \quad (1)$$

式中, $t \in (0, 1)$  为功效系数,通常取  $t = 0.9$ . 处理后得到标准化矩阵  $Y = \{y_{ij}\}$ 。

表 1 航天器各风险指标等级划分  
Table 1 The grading of risk indicator for spacecraft

风险指标		风险系数		
		0.3	0.6	0.9
技术风险 $F_1$	技术成熟性	经过批量生产	制造过样机	处在试验阶段
	技术的复杂性	有一定的复杂性	技术改进	技术创新
	技术的先进性	国内先进	国内空白	世界先进
费用风险 $F_2$	合同费用	预期之内	略超预算	承受困难
	技术费用	较少新技术	较多新技术	大量新技术
	保障费用	维护简单	维护有一定困难	现有资源难以保险
性能风险 $F_3$	飞行高度	近地空间	远地空间	星际空间
	识别能力	模糊识别	清晰识别	高清识别
	使用时间	1 年以内	1 ~ 5 年	10 年以上
管理风险 $F_4$	管理机构的效率	较高	一般	较差
	管理机构的决策力	来自高层	来自中层	来自底层
	管理层的业务水平	业务熟练	业务一般	业务较差

2.2 综合赋权原理

设由 AHP 法得到的主观权重为  $W'_j$ , 其中  $0 \leq W'_j \leq 1, \sum_{j=1}^n W'_j = 1, j = 1, 2, \dots, n$ ; 客观赋权法得到的权重为  $W''_j$ , 其中  $0 \leq W''_j \leq 1, \sum_{j=1}^n W''_j = 1, j = 1, 2, \dots, n$ . 设  $\alpha$  和  $\beta$  分别为  $W'_j$  和  $W''_j$  的重要程度,因研制风险属于成本型指标,构造如下单目标最优化模型:

$$\begin{cases} \min Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n y_{ij} (W'_j + W''_j) \\ \text{s. t. } \alpha^2 + \beta^2 = 1, \alpha, \beta \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

应用 Lagrange 条件极值原理,可得  $\alpha$  和  $\beta$  的最优解,并对其进行归一化处理且满足条件:  
 $\overline{\alpha^*} = \alpha^* / (\alpha^* + \beta^*), \overline{\beta^*} = \beta^* / (\alpha^* + \beta^*)$  可得到

$$\overline{\alpha^*} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n y_{ij} W'_j / \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n y_{ij} (W'_j + W''_j), \quad (3)$$

$$\overline{\beta^*} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n y_{ij} W''_j / \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n y_{ij} (W'_j + W''_j). \quad (4)$$

式中,  $\overline{\alpha^*}, \overline{\beta^*}$  分别为综合赋权的主客观权重系数, 因此得到综合权重:

$$W_j = \overline{\alpha^*} W'_j + \overline{\beta^*} W''_j. \quad (5)$$

指标权重确定后, 经规格化处理得出评价价值  $c_{ij}$ , 计算公式为

$$c_{ij} = y_{ij} (\overline{\alpha^*} W'_j + \overline{\beta^*} W''_j). \quad (6)$$

### 2.3 综合赋权的求解步骤

在建立航天器研制项目的风险评估模型后, 按照如下的步骤计算综合权重.

步骤 1 通过 AHP 赋权法确定主客观权重.

结合航天器的研制规律和各个风险指标的自身特性, 由相关领域的专家根据 AHP 赋权法确定风险指标的主观权重  $W'_j$ , 满足  $0 \leq W'_j \leq 1$ ,

$$\sum_{j=1}^n W'_j = 1, j = 1, 2, \dots, n.$$

步骤 2 利用熵权法确定指标的客观权重.

在航天器研制的风险评价中, 原始数据给出的是对各种类型风险的偏离程度的初步判断结果(横向比较), 而标准化的数据则是为比较程度相同, 类型不同的风险(纵向比较), 为确定风险程度的熵值提供了基础.

1) 计算第  $j$  类风险指标下, 第  $i$  种类型的比重:

$$f_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sum_{i=1}^m y_{ij}}. \quad (7)$$

2) 计算第  $j$  类风险指标的熵值<sup>[8]</sup>:

$$H_j = -k \sum_{i=1}^m f_{ij} \ln f_{ij}. \quad (8)$$

式中,  $k$  为波尔兹曼常数,  $k > 0$ , 通常取  $k = \frac{1}{\ln m}$ . 熵值  $H_j$  越大, 表示这  $m$  个评价方案在第  $j$  个指标中所包含的信息量越大; 反之越小.

3) 计算风险指标的差异系数. 差异性系数定义为  $g_j = 1 - H_j$ , 当  $i = 1, 2, \dots, m$  时, 若  $y_{ij}$  全部相等时,  $g_j = g_{\min} = 1 - H_{\max} = 0$ , 即  $H_{\max} = k \ln m = 1$ ,  $m$  为风险类型的指标个数, 风险差异性系数越大, 该类型风险的作用就越大.

4) 确定客观权数. 第  $j$  类风险指标的权数为

$$W''_j = \frac{g_j}{\sum_{j=1}^n g_j} = \frac{1 - H_j}{n - \sum_{j=1}^n H_j}. \quad (9)$$

步骤 3 计算综合赋权的主客观系数  $\overline{\alpha^*}, \overline{\beta^*}$ .

步骤 4 求出综合权重  $W_j$ .

步骤 5 计算规范化决策矩阵  $C$ :

$$C = \{c_{ij}\}, c_{ij} = y_{ij} (\overline{\alpha^*} W'_j + \overline{\beta^*} W''_j). \quad (10)$$

## 3 C-TOPSIS 法风险控制原理

当属性集中的指标过多时, 为避免因指标过多带来的权重分配混乱问题, 可以按照一定的规则对指标进行分类, 对每小类的各个指标分别进行运算求解, 求出各个方案在每类指标下的综合指标值, 再根据需要将各个综合指标值作为大类的指标进行计算. 例如, 以本文给出的模型为例, 对技术风险中各小类指标进行比较分析, 可直接得出只受技术风险约束下的方案排名. 再根据需要进行费用、性能、管理风险进行比较, 获得综合排序指标值.

TOPSIS 又称双基点<sup>[8-9]</sup>(正理想点和负理想点), 在航天器研制风险评价中, 通过计算各种类型风险与两种假想风险的“距离”的大小, 进一步计算出各种类型的风险在评价中的得分, 由于技术风险属于成本型指标, 应取得分较小的方案为最佳.

计算贴近度. 分别记正理想点和负理想点为  $\Phi^+ = c_j^+$  和  $\Phi^- = c_j^-$  ( $j \in n$ ), 其中,  $c_j^+ = \max c_{ij}$ ,  $c_j^- = \min c_{ij}$ .

采用欧式距离计算各种类型风险到正理想点  $\Phi^+$  的距离  $d_i^+$  和到负理想点  $\Phi^-$  的距离  $d_i^-$ :

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (c_{ij} - c_j^+)^2}, i = 1, 2, \dots, m; \quad (11)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (c_{ij} - c_j^-)^2}, i = 1, 2, \dots, m. \quad (12)$$

对于每种类型风险得分的计算, 原有采用相对欧式距离计算方法基本可行, 但当与正负理想点距离同时贴近时, 按相对欧式距离对方案进行排序就不能完全体现各风险的差异, 故采用“垂面射影法”<sup>[10]</sup> 计算样本在两参考点连线上射影到负理想点的距离  $U_i$ ,  $U_i$  越大, 表示该风险发生的可能性就越大.

$$U_i = \frac{\sum_{j=1}^n (c_{ij} - c_j^-)(c_j^+ - c_j^-)}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (d_i^+ - d_i^-)^2}}. \quad (13)$$

根据  $U_i$  值大小排序,  $U_i$  越大, 表示该风险发生的可能性就越大.

4 实例分析验证

4.1 综合风险指标的计算

按照图 1 所列出的风险控制模型,对各个风险进行分类,技术方案集  $E = \{E_1, E_2, E_3, E_4\}$  分别对应 4 种现有的航天器研制风险评价方案,属性集为  $F = \{F_1, F_2, F_3, F_4\}$  分别对应技术风险、费用风险、性能风险和管理风险. 对于分类集中的二级属性可用上标来表示,并通过问卷调查、专家进行打分和系统仿真等方法得到待评估的初始数据,具体参数如表 2 所示.

在 Matlab 仿真环境下建立模型,通过 AHP 法求得主观权重(见表 3,  $W'_j$ ),采用熵值赋权法获得客观权重(见表 3,  $W''_j$ ),进而求得  $\alpha^* = 0.440\,4, \beta^* = 0.559\,6$ ,再通过式(5)计算出综合赋权(见表 3,  $W_j$ ).

表 2 初始数据参数表						
Table 2 The parameter table of initial data						
方案	评价指标	$E_1$	$E_2$	$E_3$	$E_4$	
技术 风险 $F_1$	技术的成熟性 $F_1^1$	0.63	0.53	0.78	0.55	
	技术的复杂性 $F_1^2$	0.33	0.23	0.55	0.41	
	技术的先进性 $F_1^3$	0.52	0.42	0.49	0.38	
费用 风险 $F_2$	合同费用 $F_2^1$	0.36	0.35	0.45	0.32	
	技术费用 $F_2^2$	0.45	0.38	0.39	0.22	
	保障费用 $F_2^3$	0.25	0.19	0.15	0.10	
性能 风险 $F_3$	飞行高度 $F_3^1$	0.58	0.49	0.63	0.38	
	识别能力 $F_3^2$	0.49	0.57	0.38	0.36	
	使用时间 $F_3^3$	0.52	0.47	0.36	0.29	
管理 风险 $F_4$	管理机构的效率 $F_4^1$	0.48	0.35	0.55	0.33	
	管理机构的决策力 $F_4^2$	0.36	0.18	0.40	0.32	
	管理层的业务水平 $F_4^3$	0.26	0.16	0.20	0.10	

表 3 标准化数据及各指标权重  
Table 3 Standardized data and index weight

方案	评价指标	$E_1$	$E_2$	$E_3$	$E_4$	$W'_j$	$W''_j$	$W_j$	$H_j$	$c_{ij}^-$	$c_{ij}^+$
技术 风险 $F_1$	技术的成熟性 $F_1^1$	0.640 0	1.000 0	0.100 0	0.928 0	0.120 0	0.069 1	0.091 5	0.866 1	0.009 2	0.091 5
	技术的复杂性 $F_1^2$	0.718 8	1.000 0	0.100 0	0.493 8	0.100 0	0.072 6	0.084 7	0.859 3	0.008 5	0.084 7
	技术的先进性 $F_1^3$	0.100 0	0.742 9	0.292 7	1.000 0	0.080 0	0.092 3	0.086 8	0.821 2	0.008 7	0.086 8
费用 风险 $F_2$	合同费用 $F_2^1$	0.723 1	0.793 2	0.100 0	1.000 0	0.120 0	0.065 8	0.089 7	0.872 6	0.009 0	0.089 7
	技术费用 $F_2^2$	0.100 0	0.373 9	0.334 8	1.000 0	0.060 0	0.097 0	0.080 7	0.812 1	0.008 1	0.080 7
	保障费用 $F_2^3$	0.100 0	0.460 0	0.700 0	1.000 0	0.040 0	0.074 6	0.059 4	0.855 4	0.005 9	0.059 4
性能 风险 $F_3$	飞行高度 $F_3^1$	0.280 0	0.604 0	0.100 0	1.000 0	0.100 0	0.093 8	0.096 5	0.818 2	0.009 7	0.096 5
	识别能力 $F_3^2$	0.442 9	0.100 0	0.914 3	1.000 0	0.060 0	0.079 5	0.070 9	0.846 0	0.007 1	0.070 9
	使用时间 $F_3^3$	0.100 0	0.295 7	0.726 1	1.000 0	0.060 0	0.091 6	0.077 7	0.824 4	0.007 8	0.077 7
管理 风险 $F_4$	管理机构的效率 $F_4^1$	0.386 4	0.918 2	0.100 0	1.000 0	0.120 0	0.084 8	0.100 3	0.835 7	0.010 0	0.100 3
	管理机构的决策力 $F_4^2$	0.263 5	1.000 0	0.100 0	0.427 3	0.080 0	0.102 7	0.092 7	0.801 0	0.009 3	0.092 7
	管理层的业务水平 $F_4^3$	0.100 0	0.662 4	0.437 5	1.000 0	0.060 0	0.076 2	0.069 1	0.852 3	0.006 9	0.069 1

通过表 3 的数据计算规范化决策矩阵  $\{c_{ij}\}$ , 进而求得  $d_i^+, d_i^-$  和  $U_i$ , 结果见表 4, 通过排序结果可知, 方案  $E_1$  的得分最低, 因此风险最小, 与实际情况相符.

表 4 4 种方案风险综合评价结果  
Table 4 The comprehensive evaluation results of four risk projects

方案	$E_1$	$E_2$	$E_3$	$E_4$
$d_i^+$	0.200 3	0.231 7	0.323 1	0.330 3
$d_i^-$	0.101 3	0.220 4	0.238 2	0.337 3
$U_i$	0.335 8	0.487 5	0.424 3	0.505 2
排序	1	3	2	4

4.2 分类指标的计算

然而,根据本文给出的分层思想,可以采用分类的方式对各个指标进行计算,简化运算步骤. 例如,若只需对属性集  $F_1$  技术风险进行单独运算,而不考虑其他指标因素,根据运算法则可求得  $W_{j1} = \{0.42, 0.33, 0.25\}$ ,  $U_{i1} = \{0.384\,5, 0.336\,4, 0.492\,1, 0.486\,5\}$ . 根据结果可看出,单从技术风险角度来看,方案  $E_2$  的风险最低,  $E_3$  的风险最高, 因此  $E_2$  为最优方案, 其他分类集的计算方法可类似求得.

## 5 结 语

航天研制项目风险控制是一个十分特殊的问题,更是武器装备研制风险控制中的一个崭新领域.本文针对航天器多指标控制模型做了优化,提出了一种了分层思想,简化了运算步骤,在现有的 TOPSIS 方法中,引入了综合权重,既考虑了主观人为因素,又兼顾了客观实际,合理地分配了权重.最后通过对 4 种现有技术方案进行了综合评估和分类评估,得到了可靠的评估结果,该方法对航天器的风险控制具有一定的实践指导意义.

### 参考文献:

- [1] Wang J X, Roush M L. Risk engineering and management [M]. New York: New York Basel, 2000.
- [2] 迟宝山,李永泰,李军. 基于熵权-双基点研制技术风险评估方法研究[J]. 科技进步与对策, 2006, 23(10): 131-133.  
(Chi Bao-shan, Li Yong-tai, Li Jun. The research of the method of develop technical risk assessment based on entropy weight-TOPSIS[J]. *Science and Technology Progress and Policy*, 2006, 23(10): 131-133.)
- [3] 陈建中,徐玖平. 群决策的交互式 TOPSIS 方法及其应用[J]. 系统工程学报, 2008, 23(3): 276-281.  
(Chen Jian-zhong, Xu Jiu-ping. TOPSIS based interactive multi-attributes group decision-making method and its

application [J]. *Journal of Systems Engineering*, 2008, 23(3): 276-281.)

- [4] Jia P P, Zhang L, Li T. Based on AHP quantitative assessment of tourism impact [J]. *Communications in Computer and Information Science*, 2011, 10: 205-212.
- [5] 王书吉,费良军,雷雁斌. 两种综合赋权法在灌区评价中的应用研究[J]. 西安理工大学学报, 2009, 25(2): 207-211.  
(Wang Shu-ji, Fei Liang-jun, Lei Yan-bing. Two kinds of comprehensive weight combination method applied to irrigation district's evaluation [J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2009, 25(2): 207-211.)
- [6] Shariff A M, Leong C T. Inherent risk assessment; a new concept to evaluate risk in preliminary design stage [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2009, 87(6): 371-376.
- [7] Christopher S. Perspectives in supply chain risk management [J]. *Production Economice*, 2006(3): 47-51.
- [8] Xiao C, Shao D G, Yang F S. Improved TOPSIS method and its application on initial water rights allocation in the watershed [J]. *Communications in Computer and Information Science*, 2011, 11: 583-592.
- [9] Li D F. An approach to fuzzy multiattribute decision making under uncertainty [J]. *Information Sciences*, 2005, 169(1): 97-112.
- [10] Niu X F, Zhao L W. New algorithm for solving 3D incompressible viscous equations based on projection method [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2011, 08: 1817-1821.

(上接第 621 页)

解决问题时,寻优效果不但优于经典的蜂群算法,而且较其他经典算法而言,搜索精度以及寻优效果也都比较好.未来的研究工作主要集中在多目标优化问题中基于反馈的策略自适应算法的改进和有效性验证上.

### 参考文献:

- [1] Karaboga D. An idea based on honey bee swarm for numerical optimization [R]. Kayseri: Technical Report-tr06, Erciyes University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department, 2005.
- [2] Akay B, Karaboga D. A modified artificial bee colony algorithm for real-parameter optimization [J]. *Information Sciences*, 2012, 192: 120-142.
- [3] Gao W, Liu S. A modified artificial bee colony algorithm [J]. *Computers & Operations Research*, 2012, 39(3): 687-697.
- [4] Gao W, Liu S, Huang L. A global best artificial bee colony algorithm for global optimization [J]. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2012, 236(11): 2741-2753.

- [5] 罗钧,肖向海,付丽,等. 基于分段搜索策略的改进蜂群算法[J]. 控制与决策, 2012, 27(9): 1402-1410.  
(Luo Jun, Xiao Xiang-hai, Fu Li, et al. Modified artificial bee colony algorithm based on segmental-search strategy [J]. *Control and Decision*, 2012, 27(9): 1402-1410.)
- [6] Yildiz A R. A new hybrid artificial bee colony algorithm for robust optimal design and manufacturing [J]. *Applied Soft Computing*, 2013, 13(5): 2906-2912.
- [7] Khorsandi A, Hosseinian S H, Ghazanfari A. Modified artificial bee colony algorithm based on fuzzy multi-objective technique for optimal power flow problem [J]. *Electric Power Systems Research*, 2013, 95: 206-213.
- [8] Gao T, Xu Y, Xu T X, et al. A GA algorithm based on niche and discrete [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 380/381/382/383/384: 1546-1549.
- [9] Karaboga D, Akay B. A comparative study of artificial bee colony algorithm [J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2009, 214(1): 108-132.
- [10] Karaboga D, Gorkemli B, Ozturk C, et al. A comprehensive survey: artificial bee colony (ABC) algorithm and applications [J]. *Artificial Intelligence Review*, 2014, 42(1): 21-57.