

# 改进投影寻踪-灰色关联的指控系统效能评估

张 壮<sup>1</sup> 李琳琳<sup>1</sup> 余宏锋<sup>1</sup> 范宝庆<sup>2</sup>

(火箭军工程大学作战保障学院 西安 710025)<sup>1</sup> (中国人民解放军 96618 部队 北京 100085)<sup>2</sup>

**摘 要** 针对指标权重求解易受主观因素干扰,从而影响决策分析的指挥控制系统效能评估问题,提出了一种改进投影寻踪-灰色关联的效能评估方法。首先,对投影寻踪法进行改进,利用样本聚集程度和类间分散度定义了一种新的投影指标函数,通过求解投影指标函数最大值模型获得指标权重;其次,基于灰色关联投影算法,将待评估对象到参考数列的投影值作为综合效能度量的标准,实现了指挥控制系统效能评估;最后,以 5 个指挥控制系统为例,进行了实验验证,得出评估对象 5 的综合效能最高,与组合赋权法得出的结论一致,并且当指标数目大于 18 时,相比于 AHP 和组合赋权法,所提方法的运算效率最高。

**关键词** 投影寻踪,灰色关联,投影指标函数,指挥控制系统,效能评估

中图分类号 TP391 文献标识码 A DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2019.09.045

## Effectiveness Evaluation of Command and Control System Based on Improved Projection Pursuit and Grey Correlation Method

ZHANG Zhuang<sup>1</sup> LI Lin-lin<sup>1</sup> YU Hong-feng<sup>1</sup> FAN Bao-qing<sup>2</sup>

(Academy of Operational Support, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)<sup>1</sup>

(96618 Troops of the PLA, Beijing 100085, China)<sup>2</sup>

**Abstract** Aiming at the problem of effectiveness evaluation of command and control system that index weight is susceptible to subjective factors and affects decision analysis, an effectiveness evaluation method based on improved projection pursuit and grey correlation was proposed. First, the projection pursuit method is improved, and a new projection index function is defined by the degree of sampling aggregation and the degree of dispersion between classes. The index weight is obtained by solving the maximum value model of the projection index function. Second, based on the grey relational projection algorithm, the effectiveness evaluation of the command and control system is realized by using the projection value of the evaluation object to the reference series as the standard of comprehensive performance metrics. Finally, five command and control systems are taken as examples to verify the experimental results. The results show that the fifth object has the highest comprehensive efficiency, which is consistent with the conclusion of combination weighting method. And when the number of indicators is greater than eighteen, the proposed method is more efficient than AHP and combination weighting method.

**Keywords** Projection pursuit, Grey correlation, Projective indicator function, Command and control system, Effectiveness evaluation

## 1 引言

作战指挥控制系统作为信息化战争的“神经中枢”,在信息化战争中发挥着重要作用<sup>[1]</sup>。各国在加强基于信息系统的体系作战能力的同时,积极加强对指挥控制系统效能评估问题的研究,以争得信息优势进而将其转换成作战优势。

目前,大多数评估方法都是通过指标权重与指标评价值的有效组合来获取综合效能值,进而完成评估。在实际评估过程中,指标权重往往是未知的,并且易受到各种因素的干

扰<sup>[2-3]</sup>,如何降低权重求解过程中主观因素对最终评估结果的影响,是本文研究的重点内容。

文献[4]针对风力机系统的技术转移策略选择问题,提出了一种基于 AHP-TOPSIS 的混合多准则评估模型,解决了策略选择易受单一因素影响从而导致评估结果不够全面的问题。但是,该方法需要先利用层次分析法来确定指标权重,评估结果受主观因素的影响较大。文献[5]对主客观赋权方法进行了改进,对主客观权重进行了融合,从而获得了组合权重,然后通过多属性决策方法获取综合效能值,但其在主客观

收稿日期:2018-08-03 返修日期:2018-10-29 本文受国家自然科学基金(61374054),国家 863 计划资助项目(2012AA7010213)资助。

张 壮(1994-),男,硕士,主要研究方向为复杂系统效能评估及仿真,E-mail:3207969734@qq.com;李琳琳(1974-),女,副教授,主要研究方向为计算机网络及指挥信息系统,E-mail:lilinlin74@yeah.net(通信作者);余宏锋(1995-),男,硕士,主要研究方向为复杂系统效能评估及仿真;范宝庆(1984-),男,硕士,主要研究方向为信号与信息处理。

权重融合时采用了传统的方法,来阐述融合方法的合理性。文献[6]提出了一种基于区间直觉模糊集的多属性决策方法,该方法利用线性规划的方法求解指标最优权重,弥补了现有方法确定权重时过于依赖主观经验的不足。文献[7]针对属性权重已知和未知两种情况,提出了一种利用单值中智信息和间隔中智信息解决评估问题的方法,通过聚类获取加权平均算子,进而确定方案顺序。

本文针对指标权重未知且权重求解易受主观因素影响指挥控制系统效能评估问题,提出一种改进灰色关联-投影寻踪的指挥控制系统效能评估方法。对投影寻踪法进行改进,利用样本聚集程度和类间分散度构造投影指标函数,并使用改进萤火虫算法求解投影指标函数最大值优化模型,获得最佳投影方向,从而确定指标权重。利用灰色关联投影法,以正理想解为参考数列,计算各待评估对象到参考数列的灰色关联投影值,将灰色关联投影值作为待评估对象综合效能的度量标准,以实现方案排序。

## 2 研究方法

### 2.1 改进投影寻踪法

投影寻踪法<sup>[8-10]</sup>能够将不易处理的高维数据投影降维成一维数组,然后依据投影指标函数来探索和分析数据的特征,该方法在降低数据复杂性的前提下,保证了数据处理的准确性和稳健性。

#### 2.1.1 建立评估矩阵及数据标准化

指挥控制系统效能评估问题的描述为:由  $m$  个待评估对象组成的评估对象集为  $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$ ,由  $n$  个同一准则层下的指标组成的指标集为  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ ,各指标具有不同的物理意义, $V^b$  和  $V^c$  分别表示  $V$  中效益型和成本型指标的下标集。评估对象  $e_i$  在指标  $v_j$  下的评价值为  $x_{ij}$ ,评估矩阵为  $X = (x_{ij})_{m \times n}$ ,同一评估指标在不同评估对象下的指标值类型相同。矩阵  $X$  的标准化矩阵为  $X^* = (x_{ij}^*)_{m \times n}$ 。指标权重向量为  $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$ ,  $\sum_{i=1}^n \omega_i = 1$ 。为消除不同量纲对评估结果的影响,需对指标评价进行标准化处理,本文采用极值处理法,具体计算式如下:

$$x_{ij}^* = \begin{cases} \frac{x_{ij} - \min x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}}, & v_j \in V^b \\ \frac{\max x_{ij} - x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}}, & v_j \in V^c \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $\max x_{ij}$  和  $\min x_{ij}$  分别表示第  $j$  个指标的最大值和最小值。

#### 2.1.2 构造投影指标函数

设  $X^* = (x_{ij}^*)_{m \times n}$  为标准化评估矩阵,  $a = [a_1, a_2, \dots, a_n]$  为单位投影方向向量,对  $X^*$  进行线性投影,则  $X^*$  在一维投影值  $p_i$  为:

$$p_i = \sum_{j=1}^n a_j x_{ij}^* \quad (2)$$

在传统投影寻踪算法中,投影指标函数  $Q(a)$  由一维投影值  $p_i$  的标准差  $S_p$  和局部密度  $D_p$  决定。

$$Q(a) = S_p \cdot D_p \quad (3)$$

$$S_p = \left[ \sum_{i=1}^m (p_i - \bar{p})^2 / (m-1) \right]^{1/2} \quad (4)$$

$$D_p = \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m [R - d(i, k)] u[R - d(i, k)] \quad (5)$$

$$d(i, k) = |p_i - p_k| \quad (6)$$

式(4)中,  $\bar{p}$  表示  $p_i$  的均值;式(5)中,  $R$  表示局部密度的窗口半径,其取值与样本特性相关<sup>[11]</sup>,文献[9]中取  $R = 0.1 \cdot S(a)$ ,  $u$  表示单位阶跃函数;式(6)中,  $d(i, k)$  表示样本之间的距离。

$R$  取值的不同将直接导致投影指标函数值的变化,进而影响最终的评估结果。为弥补  $R$  取值受样本特性干扰的不足,本文定义了一种新的投影指标函数。

将  $m$  个一维投影值  $p_i$  聚成  $N$  ( $N \leq m$ ) 类,用  $A_h$  ( $h = 1, 2, \dots, N$ ) 表示第  $h$  类一维投影值的集合,记为:

$$A_h = \{p_i | d(\delta_h, p_i) \leq d(\delta_t, p_i), t = 1, 2, \dots, N; t \neq h\} \quad (7)$$

其中,  $d(\delta_h, p_i) = |p_i - \delta_h|$ ;  $d(\delta_t, p_i) = |x_i - \delta_t|$ ;  $\delta_h$  和  $\delta_t$  分别为第  $h$  类和第  $t$  类的聚类中心。 $In(a)$  表示样本空间的聚集程度,  $In(a)$  越小,聚类效果就越优。

$$In(a) = \sum_{h=1}^N \sum_{p_i, p_k \in A_h} d_h(p_i, p_k) \quad (8)$$

类间分散度  $Out(a)$  表示样本空间的离散程度,  $Out(a)$  越大,样本区分就越明显。

$$Out(a) = \sum_{p_i, p_k \in p} d(p_i, p_k) \quad (9)$$

则投影指标函数可用  $In(a)$  和  $Out(a)$  表示:

$$Q(a) = Out(a) - In(a) \quad (10)$$

#### 2.1.3 投影指标函数优化模型

由投影指标函数的构成可知,在样本中的指标评价确定的情况下,投影指标函数的大小仅与投影方向向量  $a$  有关,通过构造最大化优化模型,求解投影指标函数最大值所对应的投影方向向量,就能估计出最佳投影方向  $a^*$ ,  $a^*$  满足  $\sum_{j=1}^n a_j^2 = 1$ 。将  $\omega = (a_1^2, a_2^2, \dots, a_n^2)$  作为指标权重向量,不仅能够充分体现各指标对总体效能的影响程度,而且解决了权重确定过程易受主观因素影响的问题。投影指标函数优化模型如下:

$$\begin{cases} \max Q(a) = Out(a) - In(a) \\ \text{s. t. } \sum_{j=1}^n a_j^2 = 1 \end{cases} \quad (11)$$

式(11)是一个典型的复杂非线性优化问题,采用常规优化方法难以处理,本文采用改进萤火虫算法<sup>[12]</sup>解决投影指标函数优化问题。

在标准萤火虫算法中,荧光弱的萤火虫会被荧光强的萤火虫吸引,通过不断更新萤火虫的位置,从而达到寻优的目的,其位置更新函数如式(12)所示:

$$\vec{x}_i(t+1) = \vec{x}_i(t) + \beta(\vec{x}_j(t) - \vec{x}_i(t)) + \alpha \vec{\epsilon}_i \quad (12)$$

其中,  $\vec{x}_i(t+1)$  表示萤火虫  $\vec{x}_i$  第  $t+1$  次移动后的位置,  $\beta$  表示吸引度,  $\vec{\epsilon}_i$  表示服从高斯分布的随机数,  $\alpha$  表示固定步长因子。

标准萤火虫算法的位置更新函数中步长因子是固定的,在搜索过程中容易出现震荡。因此,文献[12]采用可变步长策略平衡了萤火虫的全局搜索能力,动态步长函数如式(13)所示:

$$\alpha(t) = \frac{0.4}{1 + \exp(0.015 * (t - \max T)/3)} \quad (13)$$

其中,  $t$  表示当前迭代次数,  $\max T$  表示最大迭代次数。

## 2.2 灰色关联投影法

灰色关联投影法<sup>[13-14]</sup>将投影理论与灰色系统理论相结合,思路清晰,理论简捷,是一种易于操作的多属性决策方法。该方法从整个方案空间出发,全面分析了方案之间的相互关系,避免了单方向偏差。

### 2.2.1 差异空间变换矩阵的建立

设  $X_0^* = (x_{01}^*, x_{02}^*, \dots, x_{0j}^*, \dots, x_{0n}^*)$  为参考数列,  $x_{0j}^*$  为第  $j$  个指标下各被评估对象的最大值,  $\sigma_{ij}$  为备选方案数列与参考数列之间差值的绝对值,则评估矩阵对应的差异空间变换矩阵  $\Delta$  如式(15)所示。

$$\sigma_{ij} = |x_{0j}^* - x_{ij}^*| \quad (14)$$

$$\Delta = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \dots & \sigma_{1n} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \dots & \sigma_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \sigma_{m1} & \sigma_{m2} & \dots & \sigma_{mn} \end{bmatrix} \quad (15)$$

### 2.2.2 加权灰色关联评估矩阵的确定

记  $r_{ij}$  为灰色关联系数,则:

$$r_{ij} = \frac{\sigma_{\min} + \lambda \sigma_{\max}}{\sigma_{ij} + \lambda \sigma_{\max}} \quad (16)$$

其中,  $\sigma_{\min}$  和  $\sigma_{\max}$  分别表示差异空间变换矩阵中  $\sigma_{ij}$  的最小值与最大值,  $\lambda$  为分辨系数,  $\lambda \in [0, 1]$ , 一般取  $\lambda = 0.5$ , 则基于参考数列得出灰色关联系数矩阵  $R$  为:

$$R_{(m+1) \times n} = \begin{bmatrix} r_{01} & r_{02} & \dots & r_{0n} \\ r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (17)$$

指标权重向量为  $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$ , 对  $R$  加权可得加权灰色关联评估矩阵  $R^*$ 。

$$R_{(m+1) \times n}^* = \begin{bmatrix} \omega_1 & \omega_2 & \dots & \omega_n \\ \omega_1 r_{11} & \omega_2 r_{12} & \dots & \omega_n r_{1n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \omega_1 r_{m1} & \omega_2 r_{m2} & \dots & \omega_n r_{mn} \end{bmatrix} \quad (18)$$

### 2.2.3 计算灰色关联投影值

加权灰色关联评估矩阵中各被评估对象和参考数列均可被视为一个行向量:

$$\beta_i = (\omega_1 r_{i1}, \omega_2 r_{i2}, \dots, \omega_n r_{in}) \quad (19)$$

$$\beta_i^* = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n) \quad (20)$$

设评估对象向量  $\beta_i$  与参考数列  $\beta_i^*$  的夹角  $\alpha$  为灰色关联投影角, 则两向量夹角的余弦  $d_i$  为:

$$d_i = \cos \alpha = \frac{\beta_i \cdot \beta_i^*}{\|\beta_i\| \cdot \|\beta_i^*\|} = \frac{\sum_{j=1}^n \omega_j r_{ij} \omega_j}{\sqrt{\sum_{j=1}^n [\omega_j r_{ij}]^2} \sqrt{\sum_{j=1}^n \omega_j^2}} \quad (21)$$

则  $\beta_i$  在参考数列  $\beta_i^*$  上的灰色关联投影值为  $\zeta_i$ :

$$\zeta_i = \|\beta_i^*\| \cdot \cos \alpha = \frac{\sum_{j=1}^n \omega_j^2 r_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^n \omega_j^2}} = \sum_{j=1}^n \bar{\omega}_j r_{ij} \quad (22)$$

其中,

$$\bar{\omega}_j = \frac{\omega_j^2}{\sqrt{\sum_{j=1}^n \omega_j^2}} \quad (23)$$

以各被评估对象的灰色关联投影值作为效能度量标准, 灰色关联投影值越大, 对应评估对象的综合效能值就越高。

## 3 改进投影寻踪-灰色关联算法的效能评估模型

综上所述, 改进投影寻踪-灰色关联算法的效能评估模型如图1所示, 具体实施步骤如下:

Step1 构造标准化评估矩阵  $X^*$ 。根据问题背景构造评估矩阵, 并通过式(1)统一数据量纲。

Step2 构造投影指标函数。利用投影寻踪理论, 将评估矩阵投影降维, 并根据式(8)一式(10)得出投影指标函数。

Step3 求解最佳投影方向  $a^*$ 。利用改进萤火虫算法求解投影指标函数优化模型, 计算得出使得投影指标函数值最大时对应的投影方向向量, 进而确定指标权重向量。

Step4 确定参考数列  $X_0^*$ 。从标准化评估矩阵中选出各指标的最优解组成参考数列  $X_0^*$ 。

Step5 构造差异空间变换矩阵  $\Delta$ 。依据式(14), 计算各待评估对象与参考数列之间差值的绝对值, 构造  $\Delta$ 。

Step6 计算灰色关联系数矩阵  $R$ 。根据式(16)计算各指标的灰色关联系数  $r_{ij}$ , 并构建灰色关联系数矩阵。

Step7 综合效能求解及方案排序。利用最佳投影方向向量  $a^*$  求解指标权重向量  $\omega$ , 并将  $\omega$  代入式(22), 计算各待评估对象的灰色关联投影值  $\zeta_i$ 。将  $\zeta_i$  作为方案效能度量的标准,  $\zeta_i$  越大, 对应评估对象的综合效能值越高, 排序就越靠前。

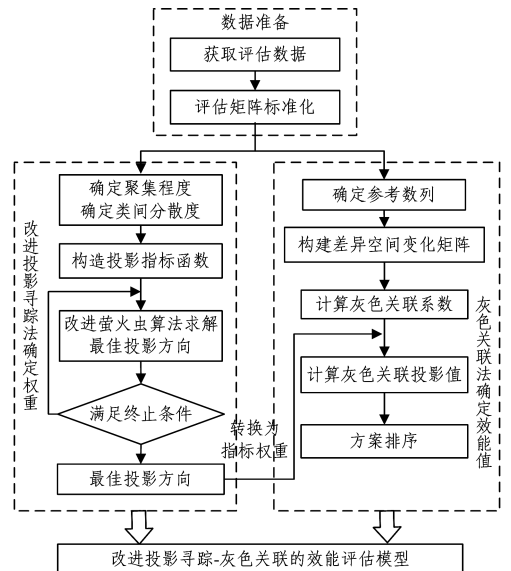


图1 改进投影寻踪-灰色关联的效能评估模型

Fig.1 Effectiveness evaluation model based on improved projection pursuit and grey correlation

## 4 实例分析

结合课题组基于信息优势的指挥控制系统指标体系的研究成果<sup>[15]</sup>, 采用本文提出的改进投影寻踪-灰色关联效能评估方法对指挥控制系统进行评估, 评估指标体系如图2所示。

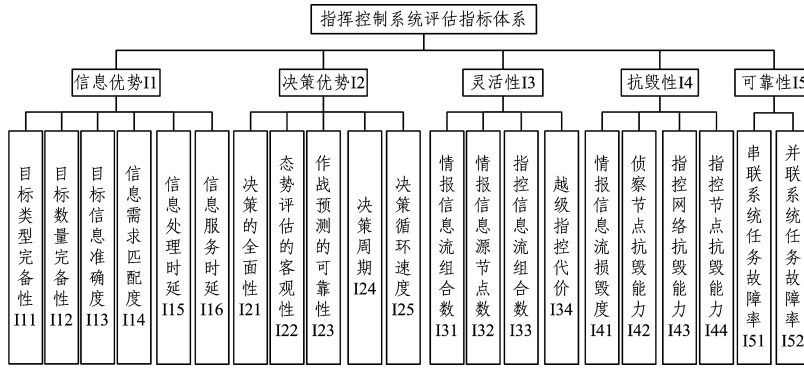


图 2 指挥控制系统评估指标体系

Fig. 2 Evaluation index system of command and control system

4.1 指标评价价值的获取及其标准化

对于 I11, I12, I15, I16 等能通过查询战标或历史数据获得的定量指标,直接按战标或历史数据取值;对于 I42, I43 等能力指标,由专家进行打分。对应指挥控制系统 5 种应用场景的各指标的评价值如表 1 所列,按照 2.1.1 节所述方法进行数据标准化,得出标准化评估矩阵 X\*。限于篇幅,本文不具体展示标准化数据。

表 1 指标评价价值

Table 1 Attribute values of index

评估对象	指标																					
	I11	I12	I13	I14	I15	I16	I21	I22	I23	I24	I25	I31	I32	I33	I34	I41	I42	I43	I44	I51	I52	
1	0.891	0.957	81.2	86.7	0.297	0.054	81.4	76.1	78.7	120												
2	0.863	0.906	79.6	77.6	0.171	0.103	90.5	80.0	76.5	65												
3	0.927	0.915	89.5	91.4	0.234	0.092	91.3	84.2	84.9	90												
4	0.904	0.849	80.0	88.3	0.249	0.043	75.5	79.6	87.6	107												
5	0.765	0.964	83.7	85.3	0.186	0.075	85.1	85.4	90.3	95												

4.2 求解指标权重

依据 2.1 节给出的改进投影寻踪法,利用聚集程度和类间分散度构建投影指标函数。利用改进萤火虫算法对投影指标函数最大值优化模型进行求解。设置改进萤火虫算法的初

表 3 灰色关联系数

Table 3 Grey correlation coefficients

评估对象	指标																				
	I11	I12	I13	I14	I15	I16	I21	I22	I23	I24	I25	I31	I32	I33	I34	I41	I42	I43	I44	I51	I52
1	0.6923	0.8914	0.3736	0.5948	0.3333	0.7317	0.4438	0.3333	0.3730	0.3333	0.4295	0.5556	0.5000	1.0000	1.0000	0.3333	0.9081	0.5957	0.4545	0.6667	0.5556
2	0.5586	0.4979	0.3333	0.3333	1.0000	0.3333	0.9081	0.4627	0.3333	1.0000	0.3333	0.3333	0.4724	0.3333	0.6504	0.3333	0.3333	0.6250	0.3810	0.3333	
3	1.0000	0.5399	1.0000	1.0000	0.5000	0.3797	1.0000	0.7949	0.5610	0.5238	0.4044	0.5556	0.5000	0.5621	0.4050	0.2178	1.0000	0.8550	0.3333	0.4444	0.5556
4	0.7788	0.3333	0.3426	0.6900	0.4468	1.0000	0.3333	0.4450	0.7187	0.3957	1.0000	1.0000	1.0000	0.3333	0.7424	1.0000	0.5097	0.5108	0.3571	0.3333	1.0000
5	0.3333	1.0000	0.4604	0.5308	0.8078	0.4839	0.5603	1.0000	1.0000	0.4782	0.6791	0.3846	0.3333	0.5033	0.4667	0.8087	0.4620	1.0000	1.0000	1.0000	0.3846

4.4 对比分析

为验证本文所提方法的有效性,分别利用 AHP<sup>[16]</sup>和文献[5]中的组合赋权法求解指标权重,然后结合灰色关联投影法计算评估对象的灰色关联投影值,结果如图 3 所示。从图 3 可以看出,本文方法与组合赋权法所得结论一致,投影值排序为  $\zeta_5 > \zeta_3 > \zeta_1 > \zeta_2 > \zeta_4$ ,即评估对象 5 的综合效能最高,

始条件为:种群规模为 50,最大吸引度为 1,光强系数为 0.5,最大迭代次数为 500。计算得出指挥控制系统各评估指标的最佳投影方向及权重,如表 2 所列。

表 2 指标最佳投影方向及权重

Table 2 Optimal projection direction and weight of index

评估指标	最佳投影方向	权重	评估指标	最佳投影方向	权重	评估指标	最佳投影方向	权重
I11	0.1517	0.023	I22	0.1871	0.035	I34	0.1581	0.025
I12	0.1703	0.029	I23	0.2864	0.082	I41	0.1449	0.021
I13	0.1643	0.027	I24	0.1871	0.035	I42	0.1517	0.023
I14	0.3033	0.092	I25	0.1549	0.024	I43	0.1673	0.028
I15	0.3130	0.098	I31	0.2258	0.051	I44	0.2324	0.054
I16	0.2366	0.056	I32	0.2168	0.047	I51	0.2702	0.073
I21	0.2898	0.084	I33	0.1949	0.038	I52	0.2345	0.055

4.3 计算灰色关联投影值

由标准化评估矩阵容易得知,各指标的正理想解都为 1,因此基于正理想解的参考数列为  $X_0^* = (1, 1, 1, \dots, 1)$ 。

依据式(14)和式(15),构造差异空间变换矩阵。依据式(16)计算各指标的灰色关联系数,结果如表 3 所列。

依据式(22),结合指标权重和灰色关联系数,计算各待评估对象的灰色关联投影值  $\zeta_i$ 。 $\zeta_1 = 0.1278, \zeta_2 = 0.1373, \zeta_3 = 0.1594, \zeta_4 = 0.1410, \zeta_5 = 0.1760$ 。灰色关联投影值越大,说明评估对象与理想方案越接近,其综合效能越高。因此,评估对象 5 的综合效能最大,评估对象 1 的综合效能最小。

评估对象 1 的综合效能最低。采用 AHP 确定权重,得出的投影值排序为  $\zeta_3 > \zeta_5 > \zeta_4 > \zeta_1 > \zeta_2$ ,即评估对象 4 的综合效能最高,评估对象 2 的综合效能最低。AHP 方法完全依赖专家给出的指标相对重要度,主观因素对综合效能的影响显著。而本文方法和组合赋权法降低了主观因素在指标权重确定过程中的影响因子,并且相对于组合赋权法,本文所提方法有效

地避免了组合权重确定过程中主、客观权重如何合理组合的问题。

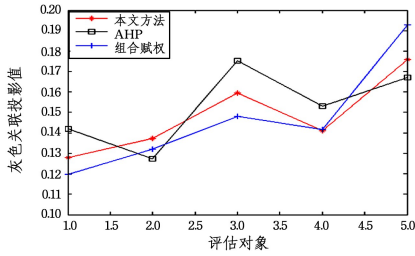


图3 对比结果

Fig. 3 Comparison results

不断增加指标数目,得出3种方法的运算时间,如图4所示。

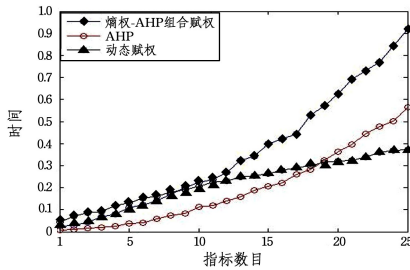


图4 运算时间

Fig. 4 Operation time

从图4中可以看出,当指标数目大于18时,组合赋权法的运算时间最长,本文方法的运算时间最短,且效率最高。

**结束语** 本文提出了一种改进投影寻踪-灰色关联的效能评估方法,有效地解决了指挥控制系统效能评估过程中指标权重的确定易受主观因素干扰的问题。将改进投影寻踪算法应用于指标权重求解过程,利用样本聚集程度和类间分散度定义投影指标函数,有效地解决了投影指标函数易受样本特性影响的问题。通过改进萤火虫算法求解投影指标函数最大值优化模型,求解最佳投影方向,进而确定指标权重,避免了人为因素的影响。结合灰色关联投影算法,通过求解各评估对象到正理想解的投影值,来确定评估对象的综合效能。实例分析表明,本文所提方法过程合理,贴合实际,为指挥控制系统的效能评估问题提供了一种新的解决思路,具有应用价值。

## 参考文献

[1] LI J. A study on capability-based methods for evaluating the architecture of Command and Control System[D]. Nanjing: Nanjing University, 2017. (in Chinese)  
李军. 基于能力的指挥与控制系统的体系结构评估方法研究[D]. 南京: 南京大学, 2017.

[2] DAS S, GUHA D. Attribute weight computation in a decision making problem by particle swarm optimization[J]. Neural Computing & Applications, 2017(1): 1-11.

[3] ČEREŠKA A, ZAVADSKAS E, CAVALLARO F, et al. Sustainable Assessment of Aerosol Pollution Decrease Applying Multiple Attribute Decision-Making Methods[J]. Sustainability, 2016, 8(7): 586.

[4] PELORUS, KARAHALIOS H. The application of the AHP-TOPSIS for evaluating ballast water treatment systems by ship operators[J]. Transportation Research Part D Transport & Environment, 2017, 52(Part A): 172-184.

[5] SONG D M, LIU C X, SHEN C, et al. Multiple objective and attribute decision making based on the subjective and objective weighting[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2015, 45(4): 1-9. (in Chinese)  
宋冬梅, 刘春晓, 沈晨, 等. 基于主客观赋权法的多目标多属性决策方法[J]. 山东大学学报(工学版), 2015, 45(4): 1-9.

[6] WANG C Y, CHEN S M. Multiple Attribute Decision Making Based on Interval-Valued Intuitionistic Fuzzy Sets, Linear Programming Methodology, and the Extended TOPSIS Method[J]. Information Sciences, 2017, 397(8): 155-167.

[7] SAHIN R, LIU P D. Maximizing Deviation Method for Neutrosophic Multiple Attribute Decision Making with Incomplete Weight Information[J]. Neural Computing and Applications, 2016, 27(7): 2017-2029.

[8] HUANG J, JIN G, YU Y B. Application of projection pursuit model to risk assessment of flood detention zones[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2016; 34(5): 60-63.

[9] PEI W, FU Q, LIU D, et al. Assessing agricultural drought vulnerability in the Sanjiang Plain based on an improved projection pursuit model[J]. Natural Hazards, 2016, 82(1): 683-701.

[10] ZHANG X, WANG T, LI S. A Projection Pursuit Combined Method for PPP Risk Evaluation[C]// International Conference on Management Science and Engineering Management. Cham: Springer, 2017: 1522-1534.

[11] HOU M M, SHAO X H. Optimization of irrigation-drainage scheme for tomato crop based on multi-index analysis and projection pursuit model[J]. Zemdirbyste-agriculture, 2016, 103(2): 221-228.

[12] YU S, ZHU S, MA Y, et al. A variable step size firefly algorithm for numerical optimization[J]. Applied Mathematics and Computation, 2015, 263(C): 214-220.

[13] GAO C L, LI S C, WANG J, et al. The Risk Assessment of Tunnels Based on Grey Correlation and Entropy Weight Method[J]. Geotechnical & Geological Engineering, 2017(4): 1-11.

[14] FAN D C, DU M Y. Dynamic Comprehensive Evaluation of the High-tech Industry Technology Innovation Ability Based on TOPSIS Grey Relation Projection Method[J]. Operations Research and Management Science, 2017, 26(7): 154-163.

[15] LI L L, LU Y F, ZHANG Z, et al. Construction and model of command and control system index based on information superiority[J/OL]. System Engineering and Electronics. [2018-01-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2422.TN.20171208.1733.020.html>. (in Chinese)  
李琳琳, 路云飞, 张壮, 等. 基于信息优势的指控系统指标体系构建及建模[J/OL]. 系统工程与电子技术. [2018-01-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2422.TN.20171208.1733.020.html>.

[16] CHATTERJEE K, KAR S. Unified Granular-number-based AHP-VIKOR multi-criteria decision framework[J]. Granular Computing, 2017, 2(4): 1-23.