

doi: 10.7690/bgzd.2018.06.019

考虑优先级的维修任务动态调度方法

王雄伟, 陈春良, 曹艳华, 陈伟龙, 吴同晗
(装甲兵工程学院技术保障工程系, 北京 100072)

摘要: 为解决目前维修任务动态调度方法研究中存在方法复杂、考虑调度规则少、实用性不强等问题, 对维修任务动态调度方法进行优化研究。综合考虑维修时间、维修前等待时间、受敌威胁程度和装备重要程度等调度规则, 运用逼近理想解排序法 (technique for order preference by similarity to an ideal solution, TOPSIS) 确定各维修任务的优先级。通过实时更新关键时间点的维修任务静态调度方案实现对维修任务的动态调度, 构建考虑优先级的维修任务动态调度模型, 并通过示例分析进行验证。验证结果表明: 新模型能用相对简单的方法解决复杂问题, 为装备保障指挥员确定维修任务调度方案提供参考。

关键词: 优先级; 维修任务; 动态调度; 逼近理想解排序法
中图分类号: TJ07 **文献标志码:** A

Dynamic Scheduling Method of Maintenance Task Considering Priority

Wang Xiongwei, Chen Chunliang, Cao Yanhua, Chen Weilong, Wu Tonghan
(Department of Technical Support Engineering, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China)

Abstract: In view the problems of complex method, considering the problem of less scheduling rules and less practicability in current research of the maintenance task dynamic scheduling method, the dynamic scheduling method of maintenance tasks is optimized. First of all, considering scheduling rules of the maintenance time, waiting time before maintenance, the degree of enemy threats and equipment severity, the TOPSIS method used to determine the priority of the maintenance tasks. Then, the model of the dynamic scheduling of the maintenance task is established by live update the static scheduling scheme of the maintenance task at the critical time point in real time. Finally, the feasibility of the model is proved by the example analysis. The result shows that new model can solve complex problems in simple way, and provide reference for the equipment maintenance commander to determine the maintenance task scheduling scheme.

Keywords: priority; maintenance tasks; dynamic scheduling; TOPSIS

0 引言

战时, 科学有效的维修任务调度策略有利于提高部队战斗力。维修任务是指本级伴随维修小组能够在规定时间内修复由于受击损坏、技术故障和自然损坏而不能继续参加作战的装备。优先级是指战时维修任务在接受伴随维修小组维修时的先后顺序。维修任务动态调度是指战时根据战场实际情况, 实时将各维修任务合理分配给各伴随维修小组的活动, 属于车间作业调度问题^[1]。

研究维修任务动态调度主要解决以下问题: 1) 将多个维修任务合理地分配给多个伴随维修小组; 2) 由于各维修任务之间存在差异, 需要对不同维修任务进行优先级排序; 3) 根据战场的实际情况, 如何实现对维修任务的动态调度。

维修任务调度问题由于具有超强的实际应用价值被广泛研究。吕学志分别基于伴随保障^[2]和定点保障^[3], 研究不同维修方式下的各简单调度规则的优劣程度, 并提出不同维修方式下最优的简单调度

规则; 万明等^[4]以维修效益最大为目标, 研究基于最大保障时间的维修任务调度模型, 并提出 2 种全新的求解算法; 朱昱等通过分析维修调度问题的特点, 分别构建了基于最大保障时间的静态调度模型^[5]和动态调度模型^[6], 并给出了求解方法。以上文献从多方面对维修任务调度问题进行了深入研究, 但是仍存在以下不足: 1) 大都基于简单调度规则进行研究, 实际应用价值不高; 2) 研究单个伴随维修小组的调度较多, 而研究多个伴随维修小组情况下的联合调度较少; 3) 以研究静态调度模型为主, 动态调度研究较少。针对以上不足, 笔者在考虑优先级的情况下, 将多个伴随维修小组的动态调度问题抽象为某时刻单个伴随维修小组的静态调度问题, 将复杂问题简化后进行研究。

1 维修任务调度规则

调度规则指一个及以上优先规则或启发规则的组合^[7], 根据其结构特征可以分为简单优先规则、组合规则、加权规则和启发式规则^[8]。

收稿日期: 2018-02-22; 修回日期: 2018-03-23

作者简介: 王雄伟(1992—), 男, 湖南人, 硕士研究生, 从事武器系统保障工程研究。

维修任务调度规则是调度规则的一个特例，维修任务调度研究可以借鉴车间作业调度的研究成果。由于基于不同的研究背景，维修任务调度规则与调度规则相比又存在一定差异。任何一种调度规则都是简单优先规则的组合。依据文献[9]中车间作业调度的简单优先规则，并结合维修任务调度特点得到维修任务调度的简单优先规则：基于单个维修工序维修时间的规则、基于总维修时间的规则、基于维修工序的规则、基于修前准备时间的规则、基于修前到达时间的规则、基于松弛时间和允许时间的规则。

由于伴随维修小组实施包干式作业，故不讨论维修工序问题。战时战场上的装备并非都是等价，一般来说指挥装备重要度较高，作战装备次之，保障装备重要度相对较低，故将装备的重要度规则考虑到维修任务的调度规则中。由于攻防重点、地貌的不同，不同地域维修任务受敌威胁程度不同，故将受敌威胁规则考虑到维修任务调度规则中。综上所述，选取维修时间规则、维修等待时间规则、装备重要度规则和受敌威胁规则 4 种调度规则作为维修任务动态调度的调度规则^[10]。

2 考虑优先级的维修任务动态调度模型

维修任务调度是一个动态的过程，动态调度可以认为是由各时刻静态调度连续的结果。通过计算某时刻战场上所有维修任务的优先级可以确定该时刻的维修任务调度方案。如果知道所有时刻的维修任务调度方案，就能实现动态调度。由于并非每时每刻维修任务调度方案都不同，只在新维修任务出现和完成某个维修任务后才需要更新调度方案。所以，在这些关键时间点更新调度方案，便可以实现对维修任务的动态调度。在计算维修任务优先级时，通过获取维修任务相对于所有伴随维修小组的优先级排序，来实现对多个伴随维修小组的动态调度。

模型边界条件：

- 1) 方法主要适应于战术级的伴随保障；
- 2) 伴随维修小组能够完成所有属于规定范围内的维修任务，即假设只要分配给了维修任务就能够修复，且各伴随维修小组是等价的；
- 3) 不考虑伴随维修小组的伤亡；
- 4) 提供充足的维修器材。

2.1 确定维修任务优先级

设有 m 个维修任务 A_1, A_2, \dots, A_m ，可用 n 个评价

指标 B_1, B_2, \dots, B_n 对各维修任务进行评价，运用 TOPSIS 法确定各维修任务的优先级。

对于任一维修任务 A_i 而言，都有 n 个评价值 $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ij}, \dots, x_{in})$ ，其中 x_{ij} 表示维修任务 A_i 的优先级评价指标中指标 B_j 的评价值，由 m 个维修任务的评价值组成初始评价矩阵

$$X = (x_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & \ddots & & \\ \vdots & & x_{ij} & \vdots \\ x_{m1} & \dots & & x_{mn} \end{bmatrix}。$$

为避免 X 中数据量纲的影响，对其进行规范化处理。TOPSIS 法中规范化处理的方法较多，文献[11]通过对比常用的规范化方法，得出向量规范化方法对 TOPSIS 法研究排序问题最为有效。选用向量规范化方法对初始评价矩阵 X 进行规范化处理，对于极大型指标通过式(1)进行处理；对于极小型指标通过式(2)进行处理。

$$c_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}}； \tag{1}$$

$$c_{ij} = \frac{1/x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (1/x_{ij})^2}}。 \tag{2}$$

标准化处理后得到标准矩阵

$$C = (c_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1n} \\ c_{21} & \ddots & & \\ \vdots & & c_{ij} & \vdots \\ c_{m1} & \dots & & c_{mn} \end{bmatrix}。$$

在标准矩阵 C 的基础上，每列乘以相对应评价指标的权重 ω_j 而得加权标准矩阵

$$E = (e_{ij})_{m \times n} = (\omega_j \times c_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} \omega_1 c_{11} & \omega_2 c_{12} & \dots & \omega_n c_{1n} \\ \omega_1 c_{21} & \ddots & & \\ \vdots & & \omega_j c_{ij} & \vdots \\ \omega_1 c_{m1} & \dots & & \omega_n c_{mn} \end{bmatrix}。$$

TOPSIS 法是根据各备选方案与理想解的欧式距离判断方案的优劣程度。计算距离之前必须求得理想解 S^+ 和负理想解 S^- ，对于极大型指标和极小型指标分别依据式(3)和式(4)进行计算：

$$\begin{cases} S^+ = \{S_j^+\} = \{\max\{e_{ij} | 1 \leq i \leq m\}\} \\ S^- = \{S_j^-\} = \{\min\{e_{ij} | 1 \leq i \leq m\}\} \end{cases}; \quad (3)$$

$$\begin{cases} S^+ = \{S_j^+\} = \{\min\{e_{ij} | 1 \leq i \leq m\}\} \\ S^- = \{S_j^-\} = \{\max\{e_{ij} | 1 \leq i \leq m\}\} \end{cases}。 \quad (4)$$

运用欧氏距离计算各维修任务到理想解和负理想解的距离。对于 n 维变量 y_i 与 y_j 之间的欧式距离^[12]为：

$$d(y_i, y_j) = \sqrt{\sum_{t=1}^n (y_{it} - y_{jt})^2}。 \quad (5)$$

由欧氏距离计算公式可知维修任务 A_i 与理想解的欧式距离为：

$$d(e_i, S^+) = \sqrt{\sum_{t=1}^n (e_{it} - S_t^+)^2}。 \quad (6)$$

维修任务 A_i 与负理想解的欧式距离为：

$$d(e_i, S^-) = \sqrt{\sum_{t=1}^n (e_{it} - S_t^-)^2}。 \quad (7)$$

贴近度^[13]是表述 2 个模糊集之间的接近程度，引入贴近度来表述维修任务与理想解和负理想解的接近程度。

$$Q_i = d(e_i, S^-) / (d(e_i, S^-) + d(e_i, S^+))。 \quad (8)$$

由贴近度的表达式(8)可知：贴近度值 Q_i 越大，说明该维修任务与理想解越接近，也就是优先级越高。通过各维修任务的贴近度可以得到各维修任务的最终排序。

2.2 确定维修任务动态调度模型

为了研究多个伴随维修小组的动态调度方案，笔者依据某时刻维修任务的优先级可以确定该时刻维修任务的静态调度方案，提出了考虑优先级的维修任务动态调度模型，如图 1 所示。

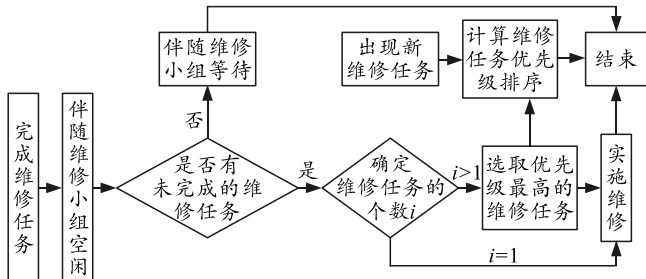


图 1 考虑优先级的维修任务动态调度模型

考虑优先级的维修任务动态调度模型以“出现新维修任务”和伴随维修小组“完成维修任务”为驱动。具体步骤如下：

1) 当出现新的维修任务时，调度模型将自动计

算当前所有维修任务相对于各伴随维修小组的贴近度，并给出优先级排序。此次驱动结束。

2) 当某伴随维修小组完成某个维修任务后，伴随维修小组处于空闲状态，这时判断建制内是否有未完成的维修任务。如果没有，伴随小组处于等待状态，此次驱动结束；如果有，执行下一步。

3) 确定建制内维修任务的个数 i ，当 $i=1$ 时，由于只有一个维修任务，故直接对其实施维修；当 $i>1$ 时，需要从剩余维修任务中选取优先级最高的维修任务实施维修。同时调度模型将自动计算剩余所有维修任务相对于各伴随维修小组的贴近度，并给出优先级排序。

4) 此次驱动结束。

3 示例分析

假设数字化合成营进攻作战中一共设有 2 个伴随维修小组(分别用 P_1 、 P_2 表示)实施伴随保障。在某时刻，伴随维修小组 P_1 正实施维修，伴随维修小组 P_2 在完成一个维修任务后，准备受领下一个任务，阵地内共有 5 个维修任务分别用 A_1, A_2, \dots, A_5 表示，装备保障指挥员从 5 个维修任务中选取相对于伴随维修小组 P_2 优先级最高的作为下一个维修任务，以此为例确定此时的维修任务调度方案。

3.1 确定评价指标体系及权重

建立维修任务优先级评价指标体系是确定其优先级的关键步骤。科学合理的指标体系是确保维修任务优先级准确的基础。根据维修任务调度的调度规则，给出维修任务优先级评价指标体系，如图 2。

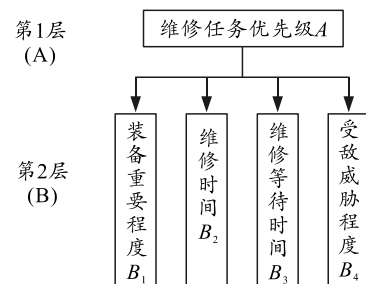


图 2 维修任务优先级评价指标体系

将作战装备分为坦克、排级指挥车、连级指挥车和营级指挥车 4 个等级，分别用标度 1~4 表示，标度越大越重要；维修时间指伴随维修小组从到达维修任务地点到完成维修所需时间；维修等待时间指伴随维修小组从当前维修地域到该维修任务的时间；受敌威胁程度指维修任务所在地受敌军炮火等威胁的程度，分为威胁大、威胁较大、一般威胁、

威胁较小和威胁小 5 个等级, 分别用标度 1~5 表示。

确定维修任务优先级时, 需要事先确定各指标的权重 ω_j , 选用 AHP 确定各指标的权重值。依据图 2 中维修任务优先级评价指标体系, 引入 1~9 的标度。根据 B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_4 对 A 的影响程度, 利用 1~9 标度进行两两对比得各评价指标相对于评价目标的重要程度, 如表 1 所示。

表 1 各评价指标关于维修任务优先级的两两比较判断矩阵

优先级 (A)	B_1	B_2	B_3	B_4	ω_i	一致性检验
B_1	1	3	4	5	0.375 3	0.001 9
B_2	1/3	1	2	3	0.251 6	
B_3	1/4	1/2	1	2	0.195 9	
B_4	1/5	1/3	1/2	1	0.177 2	

由表中 $0.001\ 9 < 0.1$ 可知: 通过一致性检验, 则得到各评价指标的权重, 如表 2 所示。

表 2 各评价指标权重

指标 权重	B_1	B_2	B_3	B_4
	0.375 3	0.251 6	0.195 9	0.177 2

3.2 确定维修任务优先级

表 3 所示为各维修任务相关情况。将表中数据作为评价维修任务 A_i 分别相对于伴随维修小组 P_1 、 P_2 的初始评价数据, 得到初始评价矩阵 X 、 X^* :

$$X = (x_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} 10 & 2 & 1 & 2 \\ 15 & 5 & 1 & 4 \\ 20 & 14 & 2 & 1 \\ 45 & 8 & 3 & 5 \\ 20 & 4 & 1 & 1 \end{bmatrix};$$

$$X^* = (x_{ij}^*)_{m \times n} = \begin{bmatrix} 10 & 7 & 1 & 2 \\ 15 & 8 & 1 & 4 \\ 20 & 5 & 2 & 1 \\ 45 & 10 & 3 & 5 \\ 20 & 10 & 1 & 1 \end{bmatrix}。$$

表 3 各维修任务相关信息统计

维修任务	维修时间/ min	相对 P_1 维修 等待时间/min	相对 P_2 维修 等待时间/min	装备重 要程度	受敌威 胁程度
A_1	10	2	7	1	2
A_2	90	5	8	1	4
A_3	20	14	5	2	1
A_4	45	8	10	3	5
A_5	20	4	10	1	1

采用 TOPSIS 法计算各维修任务的优先级。为避免不同评价指标量纲的影响, 运用软件 Matlab 7.8.0 对初始评价矩阵进行规范化处理得到标准矩阵 C 、 C^* , 依据各指标权重对标准矩阵 C 、 C^* 每

一行进行加权, 进一步得到加权标准矩阵 E 、 E^* :

$$E = (e_{ij})_{m \times n} = (\omega_j \times c_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} 0.265\ 8 & 0.205\ 9 & 0.049\ 0 & 0.051\ 7 \\ 0.177\ 2 & 0.082\ 4 & 0.049\ 0 & 0.103\ 4 \\ 0.132\ 9 & 0.029\ 4 & 0.098\ 0 & 0.025\ 8 \\ 0.059\ 1 & 0.051\ 5 & 0.146\ 9 & 0.129\ 2 \\ 0.132\ 9 & 0.103\ 0 & 0.049\ 0 & 0.025\ 8 \end{bmatrix};$$

$$E^* = (e_{ij}^*)_{m \times n} = (\omega_j \times c_{ij}^*)_{m \times n} = \begin{bmatrix} 0.300\ 3 & 0.116\ 0 & 0.049\ 0 & 0.051\ 7 \\ 0.033\ 4 & 0.101\ 5 & 0.049\ 0 & 0.103\ 4 \\ 0.150\ 2 & 0.162\ 4 & 0.098\ 0 & 0.025\ 8 \\ 0.066\ 7 & 0.081\ 2 & 0.146\ 9 & 0.129\ 2 \\ 0.150\ 2 & 0.081\ 2 & 0.049\ 0 & 0.025\ 8 \end{bmatrix}。$$

根据式(3)、式(4)并运用软件 Matlab 7.8.0 得出理想解和负理想解分别为:

$$S^+ = (0.059\ 1 \quad 0.029\ 4 \quad 0.146\ 9 \quad 0.129\ 2),$$

$$S^- = (0.265\ 8 \quad 0.205\ 9 \quad 0.049\ 0 \quad 0.025\ 8);$$

$$S^{*+} = (0.033\ 4 \quad 0.081\ 2 \quad 0.146\ 9 \quad 0.129\ 2),$$

$$S^{*-} = (0.300\ 3 \quad 0.162\ 4 \quad 0.049\ 0 \quad 0.025\ 8)。$$

运用 Matlab 7.8.0 计算各维修任务与 2 个伴随维修小组 P_1 、 P_2 的理想解和负理想解的欧氏距离, 如表 4、5 所示; 运用 Matlab 7.8.0 计算得出各维修任务分别相对于 2 个伴随维修小组 P_1 、 P_2 的贴近度, 如表 6、7 所示。

表 4 各维修任务相对于伴随维修小组 P_1 的理想解及负理想解的距离

维修任务	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5
$d(e_i, S^+)$	0.299 2	0.164 4	0.136 2	0.022 1	0.176 5
$d(e_i, S^-)$	0.025 8	0.170 7	0.226 3	0.294 7	0.168 1

表 5 各维修任务相对于伴随维修小组 P_2 的理想解及负理想解的距离

维修任务	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5
$d(e_i, S^{*+})$	0.296 8	0.103 3	0.182 5	0.033 4	0.184 2
$d(e_i, S^{*-})$	0.053 1	0.284 6	0.157 9	0.285 4	0.170 7

表 6 各维修任务相对于伴随维修小组 P_1 的贴近度

维修任务	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5
贴近度	0.079 5	0.509 4	0.624 4	0.930 4	0.487 9

表 7 各维修任务相对于伴随维修小组 P_2 的贴近度

维修任务	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5
贴近度	0.151 8	0.733 6	0.463 9	0.895 3	0.481 0

贴近度越大的维修任务与理想解越靠近, 即贴近度更大的维修任务其维修优先级更高。由贴近度可得各维修任务的优先级。从表 6 和表 7 可以得到: 相对于伴随维修小组 P_1 而言, 各维修任务的优先级排序为 $A_4 > A_3 > A_2 > A_5 > A_1$; 相对于伴随维修小组

P_2 而言，各维修任务的优先级排序为 $A_4 > A_2 > A_5 > A_3 > A_1$ 。

3.3 确定维修任务动态调度方案

由表 6 和表 7 可以分别得到当前各维修任务相对于 2 个伴随维修小组的优先级别。由考虑优先级的维修任务动态调度模型可确定此时的维修任务调度方案。

1) 伴随维修小组 P_2 完成一个维修任务后处于空闲状态，且战场上有 5 个未处理的维修任务，故选取相对于伴随维修小组 P_2 优先级最高的 A_4 作为下一个维修任务，同时重新计算剩余维修任务相对于伴随维修小组 P_2 的优先级排序。

2) 在没有新维修任务出现的情况下，当伴随维修小组 P_1 完成目前维修任务后也会处于空闲状态，战场上有 4 台未修复的受损装备，故选取相对于伴随维修小组 P_1 优先级最高的 A_3 作为下个维修任务。

3) 在没有完成目前维修任务之前出现新的维修任务，则依据维修任务优先级确定模型，重新计算各维修任务分别相对于伴随维修小组 P_1 、 P_2 的优先级排序。

3.4 结果分析

装备保障指挥员根据战场态势临时决策维修任务动态调度方案与当前陆军部队战时维修任务调度，通过对比新模型可以得出以下结论：

1) 新模型在各伴随维修小组处于维修状态下计算确定各维修任务的优先级别和调度方案，能够有效地缩短调度决策时间，提高决策效率；

2) 新模型通过计算得出较为合理的优先级排序，避免由于装备保障指挥员主观性过强造成的决策失误；

3) 根据战场的变化，新模型通过计算更新关键时间点的调度方案，实现对维修任务的动态调度，符合战时实际要求；

4) 通过同时计算各维修任务相对于 2 个伴随维修小组的优先级，实现对 2 个伴随维修小组的同时调度，相比单个伴随维修小组调度方案而言，更符合战时要求。

4 结论

通过示例分析，考虑优先级的维修任务动态调

度模型将动态调度转化为关键时间点的静态调度，解决了维修任务动态调度的实际需求；通过分别计算维修任务相对于不同伴随维修小组的优先级，解决多个伴随维修小组联合调度的实际问题；通过综合考虑维修时间、维修等待时间、装备重要程度和受敌威胁程度等调度规则确定维修任务的优先级，解决调度规则单一问题。新模型将多个伴随维修小组动态调度问题化解为单个伴随维修小组静态调度问题，用相对简单的方法解决了复杂问题，为部队确定战时维修任务调度方案提供参考。

参考文献：

- [1] JOHNSON S M. Optimal two and three-stage production schedules with setup times included[J]. *Naval Research Logistics*, 1954, 1(1): 61-68.
- [2] 吕学志, 于永利, 张柳, 等. 伴随修理中的维修任务调度策略[J]. *系统工程理论与实践*, 2013, 33(1): 209-214.
- [3] 吕学志, 王宪文, 范保新, 等. 定点修理中维修任务调度策略的仿真评估[J]. *火力与指挥控制*, 2015, 40(1): 70-76.
- [4] 万明, 张凤鸣, 樊晓光. 战时装备维修任务调度的两种新算法[J]. *系统工程与电子技术*, 2012, 34(1): 107-110.
- [5] 朱昱, 宋建社, 王正元. 一种基于最大保障时间的战时装备维修任务调度[J]. *系统工程与电子技术*, 2007, 29(11): 1900-1903.
- [6] 朱昱, 宋建社, 王正元. 基于最大保障时间的战时装备维修任务调度模型[J]. *火力与指挥控制*, 2009, 34(1): 11-14.
- [7] JR G W S. Heuristics in Job-Shop scheduling[J]. *Management Science*, 1966, 13(3): 167-190.
- [8] TAY J C, HO N B. Evolving dispatching rules using genetic programming for solving multi-objective flexible Job-Shop problem[J]. *Computers and Industrial Engineering*, 2008, 54(3): 453-473.
- [9] 范华丽, 熊禾根, 蒋国璋, 等. 动态车间作业调度问题中调度规则算法研究综述[J]. *计算机应用研究*, 2016, 33(3): 648-653.
- [10] 王华, 何伟, 陈永科. 炮兵维修分队保障行动仿真训练与评估系统[J]. *兵工自动化*, 2017, 36(2): 50-55.
- [11] 廖炎平, 刘莉, 邢超. TOPSIS 中不同规范化方法的研究[J]. *北京理工大学学报*, 2012, 32(5): 871-880.
- [12] LELE S, RICHTSMEIER J T. Euclidean distance matrix analysis: confidence intervals form and growth differences[J]. *Am J Phys Anthropol*, 1995, 98(1): 73-86.
- [13] 张福坤, 王寒, 诸克军. 基于不同距离的 TOPSIS 油田开发方案组合优选[J]. *数学的实践与认识*, 2015, 45(4): 158-164.