

doi: 10.7690/bgzdh.2020.02.007

基于改进遗传算法的多弹协同攻击航路规划

杨 咪^{1,2}, 张 安¹, 毕文豪¹, 王嘉隆¹

(1. 西北工业大学航空学院, 西安 710072; 2. 中国电子科技集团有限公司数据链技术重点实验室, 西安 710000)

摘要: 针对多弹协同攻击航路规划问题, 提出一种基于改进遗传算法的多弹协同航路规划方法。通过优化航路种群初始化的方法, 生成能够满足最大航路点个数约束以及最小航路段长度约束的航路; 采用亚种群归类将航路区分为不同的走向, 得到多种攻击航路结果; 利用进化算子对子代航路进行微调, 生成更符合要求的多条航路, 并对多弹攻击航路进行仿真验证。结果表明, 该算法可得出最优和多条次优航路, 符合多弹协同作战的目的和要求。

关键词: 多弹协同攻击; 种群初始化; 亚种群归类; 进化算子

中图分类号: TJ765.1 **文献标志码:** A

Multi-missile Cooperative Attacking Routing Planning Based on Improved Genetic Algorithm

Yang Mi^{1,2}, Zhang An¹, Bi Wenhao¹, Wang Jialong¹

(1. School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. Key Laboratory of Data Link Technology, China Electronics Technology Group Corporation, Xi'an 710000, China)

Abstract: To solve multi-missile cooperative attacking routing planning problem, a method of rout planning for multi-missile cooperative attack based on improved genetic algorithm is proposed. Firstly, by optimizing the route population initialization method, the route which can satisfy the maximum number of route points and the minimum route segment length constraint is generated. Then the routes are divided into different directions by sub-population classification to obtain various attack routes results. Finally, the evolution operator is used to modify the sub-routes to generate more suitable routes. The simulation is used for verify the multi-missile attack routes. The results prove that the algorithm can obtain the optimal and multiple sub-optimal routes, which meets the purpose and requirements of multi-missile coordinated operations.

Keywords: multi-missile cooperative attacking; population initialization; sub-population classification; evolution operators

0 引言

多弹协同是未来武器装备高度信息化条件下能够形成有效打击的重要手段之一, 其中多弹协同航路规划更是实现导弹成功突防的关键环节。在协同作战方式下, 各弹能够有效提高搜索和识别敌方运动目标的能力、突防能力和目标的跟踪精度, 使编队的综合作战效能得到大幅度提高^[1-3]。

多弹协同攻击航路规划方法较多, 可以分为基于智能优化的航路规划方法^[4-7]和基于几何原理的航路规划方法^[8-11]。智能型优化算法采用自适应的搜索方法, 具有寻优能力强的特点, 更适用于解决多弹协同攻击的航路规划问题。作为经典的智能优化算法, 遗传算法不要求目标函数的可微及连续性, 可在允许的时间范围内找到大规模优化问题的满意解, 得到了研究者的广泛关注。文献[12]在建立连续的威胁概率函数模型、构建航路规划目标函数模

型时, 将遗传算法应用到航路规划中; 文献[13]构建了多无人机协同突防航路规划模型, 并采用合作型协同进化遗传算法对模型进行求解; 文献[14]采用蚁群算法的搜索策略生成航线的初始种群, 然后用遗传算子对其进行遗传操作, 进而搜索出最优航线; 文献[15]则将遗传算法与人工势场法相结合, 得出有效的路径规划结果。笔者采用一种改进的遗传算法优化初始航路, 形成一个对多弹攻击飞行航路分析及优化的求解模型。

1 协同航路规划建模

1.1 航路编码

采用平行等分法对规划区域进行处理, 具体方法为: 用 1 条直线连接发射点与目标点; 随后用 1 组垂直于上述直线的平行线族将其等距分割, 相邻 2 条平行线之间的距离为最小航路段长度。针对反

收稿日期: 2019-10-16; 修回日期: 2019-11-24

基金项目: 国家自然科学基金(61573283); 数据链技术重点实验室开放基金(CLDL-20182113)

作者简介: 杨 咪(1995—), 女, 陕西人, 博士, 从事多飞行器协同控制、信息融合、任务分配等研究。E-mail: yangmi@mail.nwpu.edu.cn。

舰导弹多弹协同航路规划的需求，笔者设计了一种实数编码方案。导弹航路可由发射点到目标点之间的一系列有序航路点确定，每个航路点应该包括其经纬度值和该点到下一点的转向角度值。由此，航路点编码为

$$\text{Path_Point}=\{x,y,\alpha\}。 \quad (1)$$

其中： x, y 分别代表此航路点的经纬度值； α 为该航路点到下一航路点相对于平行线的方位角。

如图 1 所示， S 为发射点， G 为目标点。 $L_1 \sim L_7$ 为垂直于 SG 的平行线族，其相邻间距为最小航路长度。每条平行线上选取一点作为航路点，将 S 点和每条平行线上选取的点以及 G 点相连，即可确定一条从发射点到目标点的航路，可得第 i 个航路点到第 $i+1$ 个航路点的距离 l_i 为：

$$l_i=l_{\min}/\sin\alpha_i。 \quad (2)$$

其中 l_{\min} 为最小航路长度。

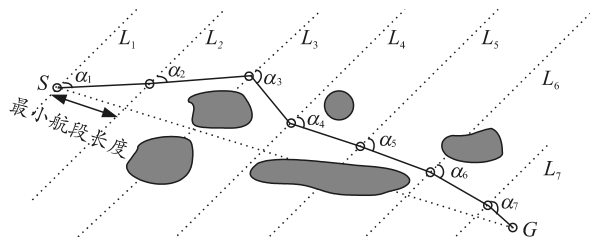


图 1 航路编码

1.2 适应度评价指标

单航路适应度评价指标用以体现单枚导弹航路规划中应遵守约束条件和期望指标。单条航路的适应度评价主要应考虑航路的可行性和优劣性。影响航路可行性的主要因素有 2 点：航路是否与禁飞区相交、是否满足导弹自身性能约束；影响航路优劣性的主要因素有总航程、平滑度及其飞行安全程度。

单条航路的适应度函数 $f(m)$ 可描述为：

$$f(m)=\delta_r R(m)+\delta_s S(m)+\delta_c C(m)。 \quad (3)$$

其中： $R(m)$ 为总航程； $S(m)$ 为平滑度指标； $C(m)$ 为安全性指标； δ_r 、 δ_s 和 δ_c 分别为其所占权重，满足：

$$\delta_r+\delta_s+\delta_c=1。 \quad (4)$$

1) 总航程指标 $R(m)$ 。

由于对规划空间使用了平行等分法进行建模，在此算法中仅需考虑导弹最大航程的约束，所以可将 $R(m)$ 表示为

$$R(m)=(\text{Range_max}-\sum_{i=1}^{n-1}l_i-\text{Range_Last})/10。 \quad (5)$$

其中： Range_max 为导弹最大航程； n 为航路点总数（包含发射点和目标点）； l_i 为第 i 段航路的长度；

Range_Last 为导弹的末段攻击距离。 $R(m)$ 值越大，则表示此条航路航程越短，其指标越优。

2) 平滑度指标 $R(m)$ 。

航路的平滑度体现在航路的转弯点个数及转弯角大小的平均值，若航路的波折越小，则平滑度越高，导弹在转弯点处因转弯引起的误差就越小。 $R(m)$ 的表达式如下：

$$\left. \begin{aligned} S(m) &= -\sum_{i=1}^{n-2} \alpha_i / (n-2) \\ \alpha_i &\leq \text{Angle_max} \end{aligned} \right\}。 \quad (6)$$

$R(m)$ 越大，说明航路的平均转弯角越小，即航路的平滑度越高。

3) 安全度指标 $C(m)$ 。

可定义航路安全度为航路与禁飞区之间的远近程度，航路距离禁飞区越近，代表其安全度越低。可求出一条航路中第 i 条航路段与其相邻最近禁飞区的最小间距，设为 d_i 。则有

$$C(m)=\sum_{i=1}^{n-1}d_i。 \quad (7)$$

其中 d_i 值越大，表示航路安全性越高。

综上所述：适应度函数 $f(m)$ 的值越大，说明此条航路适应度越高，为较优航路。当 $f(m)$ 取得极大值时，所对应的航路为最优航路。

4) 多弹空间协同约束。

为了避免多枚导弹在飞行过程中相互碰撞，要求两航路个体之间的最小距离应大于允许的最小值。设空间协同约束指标函数为：

$$R(k)=\min_{i=1,i \neq j}^x \{\text{dis}(p_i, p_j)\} - D_{\min}。 \quad (8)$$

其中： x 为航路个体的个数； $\min_{i=1,i \neq j}^x \{\text{dis}(p_i, p_j)\}$ 为航路段 i 与航路段 j 的最小间距，计算此最小间距时，不考虑在发射点处和目标点处航路段的重合情况； D_{\min} 为相邻 2 条航路之间为避免碰撞所能允许的最小间距，是一常量。当 $R(k) > 0$ 时，两航路的最小间距符合多弹空间协同约束条件。

5) 多弹末段攻击角约束。

在某些任务场景中，多弹需要从多角度对目标进行攻击，但如果在航段末段添加过渡航段会增加敌方目标逃逸的概率，增大被拦截的风险，降低作战效能；因此，需要在导弹规划的全过程中考虑导弹末段的角度约束，避免规划出多条相似航路，保证多弹协同的意义。如图 2 所示，通过在目标点附近添加虚拟禁飞区来约束末段攻击角。

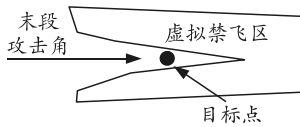


图 2 末段攻击角约束

2 航路规划算法

2.1 航路种群初始化

在传统遗传算法中，初始种群通常是随机生成的，会造成初始航路中的某些节点极其突兀，影响结果。平行分割线的特点已经使生成的航路能够满足最大航路点个数约束和航路段最小长度约束，故生成初始航路种群时要对航路点的选择加以限制，使其满足条件：如图 3 所示，选取的航路点所确定的航路段不能与禁飞区相交；必须小于或等于此段航路允许的最大转弯角，从而确保生成的初始航路均为可飞航路。

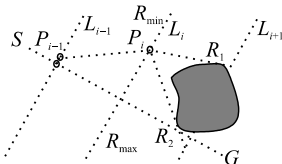


图 3 航路点选取

2.2 亚种群数量等量化

亚种群代表的是一组相似路径，其中任意 2 条路径之间均不存在障碍物和威胁区。在不同的亚种群中，个体的数量通常不相同，甚至可能出现有些亚种群中个体数量很多，而有些亚种群中个体数量很少的情况，会导致算法的早熟收敛。为了避免出现上述问题，需要对亚种群中的个体数量进行等量化调整，在航路初始化完成后和进化过程中均需保持所有亚种群中的个体数量相等且不变。具体方法如下：

1) 为亚种群设定一个恒定的个体数 u_i ，此数值过小会影响个体的多样性，过大则会增大计算量，影响算法效率。

2) 当某个亚种群中个体数大于 u_i ，为 u_i+u_1 时，将种群中的个体按适应度值进行排序，使用精英个体保留策略，剔除适应度最差的 u_1 个个体，保留 u_i 个个体进入下一代进化计算。

3) 当某个亚种群中个体数小于 u_i ，为 u_i-u_2 时，使用小扰动变异繁殖此亚种群中的个体 u_2 个，使其种群个体数量达到 u_i 。

2.3 遗传进化算子

笔者设计的进化算子包括单点进化算子和多点

进化算子。其中：单点进化算子用于相邻 2 条平行线之间、短距离内航路的进化操作；多点进化算子用于涉及多条平行线的、较大范围内航路的进化操作。所有进化算子的操作仅针对发射点和目标点以外的其他航路点。

2.3.1 单点进化算子

1) 交叉算子。

在任意 2 条航路上，分别随机选取 2 个航路点作为操作点。将每条航路上操作点之间的一个或多个航路段删除，定义靠后的操作点为交叉点，并和前一个操作点相连。通过此操作将前后 2 段航路用新生成的航路段连接，生成新航路。然后计算新航路的适应度值，如果其为不可飞航路，则将其删除；如果生成的新航路为可飞航路，则将其归类到某个亚种群中。

如图 4 所示：在 2 条航路上，分别选取 2 个航路点 (i_3, i_7) 和 (j_3, j_5) 作为操作点。将每条航路上 2 个操作点间的航路段删除，替换为交叉点换位连接之后形成的两段新航路 (图中虚线所示)。

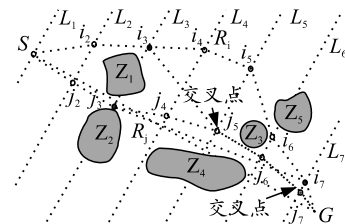


图 4 交叉算子

2) 删除算子。

单点删除算子可以有选择性地删除航路中转弯角最大的航路点或转弯角最小的航路点，再用直线连接删除点前后的多个航路点。若经过此进化操作后，新生成的航路为不可飞航路或个体适应度值下降，则忽略此次操作的结果，将进化操作前的个体直接复制作为下一代。

如图 5 所示，航路 R_i 中转弯角最小的是航路点 i_3 ，将此航路点删除后，可起到缩短航路的作用。航路 R_j 中转弯角最大的是航路点 j_4 ，删除此航路点后，该段航路航程明显缩短，平滑度明显提高。

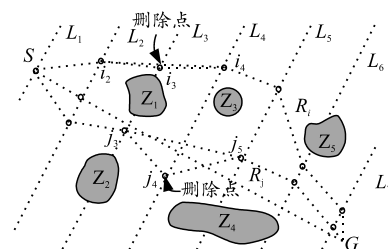


图 5 单点删除算子

3) 扰动算子。

在多弹协同航路规划中，各弹需要满足空间协同约束条件，即防止航路间距过小引起导弹碰撞。如图 6 所示，当任意 2 条航路中的航路点 A 、 B 的间距小于 D_{min} 时，使用扰动算子对此处的 2 个航路点中的一个 (A 或 B) 进行微调，使其远离另一个航路点 (B 或 A)，直至两点间距离大于 D_{min} 。 i_5 与 j_5 距离不符合要求时，将 i_5 点的位置进行微调，使其远离 j_5 。

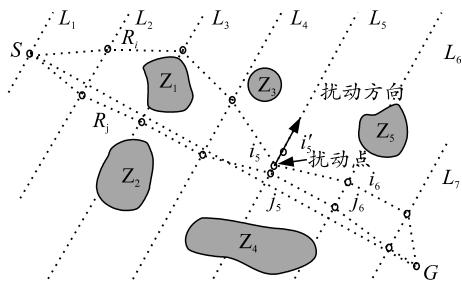


图 6 航路间距扰动算子

2.3.2 多点进化算子

1) 多点删除算子。

多点删除算子与单点删除算子的作用相同，直接将相隔较远的 2 个航路点相连，可以减少航路中的航路点，在缩短航路总航程的同时提升航路的平滑度。

2) 多点扰动算子。

虽然在航路初始化时就已经排除了与禁飞区相交的航路，但是在进化过程中新生成的子代航路中会出现与禁飞区相交的情况，此时需要对与禁飞区相交的航路段进行处理，使之绕行禁飞区。使用多点扰动算子对某条航路进行操作时，需要选择某条航路上进行操作的航路点，令其在各自所在的平行线上向同一方向移动(向上或向下)，直至新生成的航路段均不与禁飞区相交。如图 7 所示，航路点 i_2 与 i_6 之间的航路段均与禁飞区相交；因此，选择 i_2 至 i_6 为扰动点，在其各自所在的平行线上同时向上或向下扰动，可得图中的 2 条加粗虚线航路。

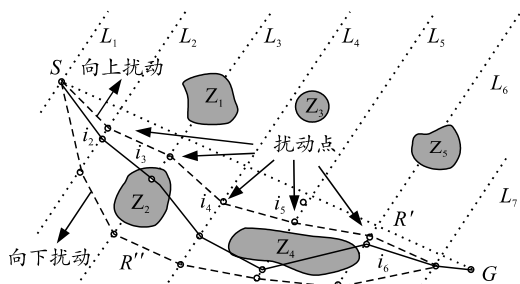


图 7 多点扰动算子

2.4 算法基本流程

笔者设计的基于改进遗传算法的多弹协同航路规划基本流程如图 8 所示：1) 使用平行等分法对规划环境进行建模，并引入各项约束条件；2) 利用编码遗传算法中的种群生成初始航路；3) 归类亚种群，为其设定相同的个体规模；4) 设计适应度评价指标；5) 使用文中设计的进化算子对初始航路进行操作，生成子代航路。

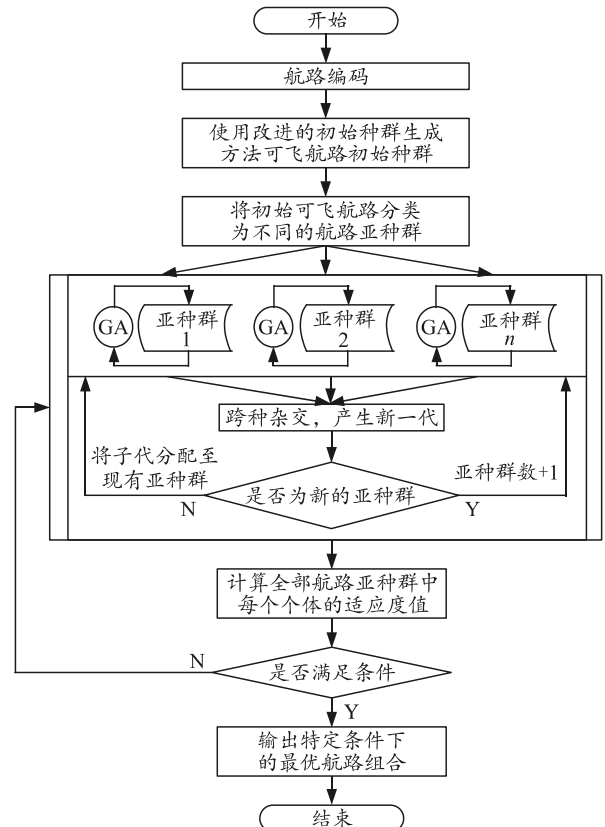


图 8 航路规划流程

3 仿真算例与分析

采用 Matlab 对文中的改进遗传算法进行模拟。仿真中反舰巡航导弹的飞行能力约束如下：

- 1) 最大射程为 800 km；
- 2) 最小航路段长度为 20 km；
- 3) 最大航路点数为 40 个；
- 4) 最大转弯角为 60°；
- 5) 两航路之间的最小间距为 1 km；
- 6) 飞行速度为 $Ma0.9$ 。

适应度函数中各项指标的权重为 $\delta_r + \delta_s + \delta_c = 1$ ，其中：航路总航程指标权重 $\delta_r = 0.4$ ；航路平滑度指标权重 $\delta_s = 0.4$ ；航路安全性指标权重 $\delta_c = 0.2$ 。

算法相关参数如下:

- 1) 最大进化代数为 80;
- 2) 每个亚种群规模为 10;
- 3) 亚种群内变异概率为 0.8;
- 4) 跨种杂交概率为 0.2;

5) 导弹发射点位置坐标为(50 km, 150 km), 目标点位置坐标为(400 km, 350 km)。所得结果如图 9 所示。

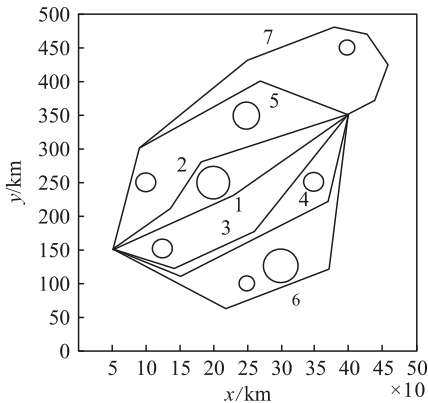


图 9 多弹协同航路规划仿真结果

图中生成了 7 个不同的航路亚种群, 分别对应 7 种从发射点到目标点的不相似路径。在每个航路亚种群中取适应度最高的航路个体便组成了图中的备选航路集合。每条航路的相关参数如表 1 所示。

表 1 航路参数

航路编号	总航程/km	所需飞行时间/s	航路点数	末段攻击度/(°)
1	411.0	1 370.2	1	-42.17
2	421.2	1 404.3	2	-16.53
3	453.0	1 510.1	2	-50.46
4	487.5	1 625.3	2	-76.17
5	554.2	1 847.4	2	19.92
6	584.2	1 947.3	2	-81.87
7	714.3	2 381.2	6	162.12

如图 10 所示, 若不使用笔者提出的亚种群归类法对航路分类, 会导致最终生成的多条航路为相似航路。

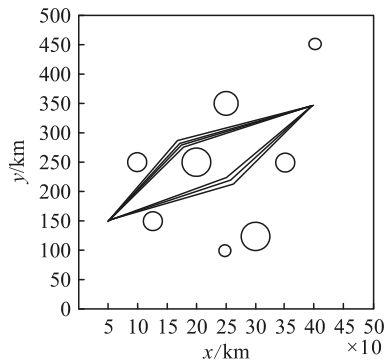


图 10 不使用亚种群归类的航路规划结果

与其他改进算法的航路规划结果对比, 笔者提

出的改进遗传算法为多弹攻击提供了多种优化航路策略, 其优点在于:

1) 基于改进遗传算法的航路规划结果, 当导弹个数小于备选航路个数时, 可在一定的实际战术需求下, 参考各条航路的末段攻击方向以及绕行禁飞区的策略, 选择较为理想的航路; 当导弹个数大于备选航路个数时, 可将各航路亚种群中的次优解补充到备选航路集合中, 提供更多可行航路, 保证多弹协同攻击的意义。

2) 而对于未使用本算法的航路规划结果, 2 个亚种群中每条航路的末段攻击角度相差很小, 不能满足多弹多角度协同攻击的约束; 因此, 必然会降低攻击效果。此外, 每条航路的总航程与所需飞行时间都极为相近, 会对同基发射的导弹造成巨大影响, 将导致多弹协同攻击无法实现。

4 结束语

笔者提出一种基于改进遗传算法的多弹协同航路规划方法, 通过优化航路种群初始化方法, 生成满足航路质量约束的可飞初始航路, 同时对初始航路进行亚种群归类, 保证多弹协同攻击的意义, 最后对进化算子进行改进, 生成更符合多弹协同攻击要求的航路, 保证了多弹协同攻击的可行性和有效性, 具有较高的工程实用性。

参考文献:

- [1] 商巍, 赵涛, 环夏, 等. 导弹武器系统协同作战研究[J]. 战术导弹技术, 2018(2): 31-35.
- [2] 刘钢, 老松杨, 谭东风, 等. 反舰导弹航路规划问题的研究现状与进展[J]. 自动化学报, 2013, 39(4): 347-359.
- [3] FU Y, DING M, ZHOU C, et al. Route Planning for Unmanned Aerial Vehicle (UAV) on the Sea Using Hybrid Differential Evolution and Quantum-Behaved Particle Swarm Optimization[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2013, 43(6): 1451-1465.
- [4] MOHANTA J C, PARHI D R, PATEL S K. Path planning strategy for autonomous mobile robot navigation using Petri-GA optimisation[J]. Computers and Electrical Engineering, 2011, 37(6): 1058-1070.
- [5] 李红亮, 宋贵宝, 李高春. 反舰导弹协同攻击航路规划与重规划[J]. 电光与控制, 2012, 19(12): 18-22.
- [6] 张承果, 丁勇, 申兴盼. 基于量子双向 RRT 算法的多平台反舰导弹协同航路规划[J]. 火力与指挥控制, 2017, 42(4): 36-41.
- [7] 陈玉文. 反舰导弹航路规划快速搜索算法[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(20): 6424-6435.

5 结束语

笔者运用网络信息技术搭建军用车辆装备管理平台,实现运输保障的互联互通互操作,提升军车保障能力和服务质量,以适应信息化战争的需求。虽然因为军事装备高保密性要求,形成了军用信息平台建设与互联网运用之间的天然沟壑,但随着“北斗”系统的不断完善和军队网络的全覆盖,拥有完全自主的网络体系,“网约”军用车辆装备也能在不久的将来得以实现。

参考文献:

[1] 王静. 中国网约车的监管困境及解决[J]. 行政法究, 2016(2): 49-59.
 [2] 李胤. 网约车平台法律责任边界研究[J]. 交通世界, 2018(34): 10-11.
 [3] 侯登华. “四方协议”下网约车的运营模式及其监管路径[J]. 法学杂志, 2016, 37(12): 68-77.
 [4] 白莹莹, 刘均禄, 卢滢伊. 新规视野下网约车运营模式及其主体责任分析[J]. 经贸实践, 2017(7): 9-11.

(上接第 4 页)

4 结论

笔者针对装备维修器材筹措工作中的品种选择问题,应用决策树分类方法进行典型装备正常周转器材库存数据挖掘分析,得到器材筹措品种选择需要重点考虑的因素及各因素的重要性。该研究能够为装备保障方案优化提供依据,为实际工作中的装备维修器材筹措提供指导。

参考文献:

[1] 朱明. 数据挖掘[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2008: 63-64.
 [2] 范明, 牛常勇. 数据挖掘基础教程[M]. 北京: 机械工

(上接第 32 页)

[8] 刘钢, 老松杨, 谭东风. 基于功能区域的反舰导弹逆向航路规划[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(4): 799-805.
 [9] 赵永涛, 胡云安, 熊厚情. 基于 HLA 的舰空巡飞弹协同指导作战仿真系统方案[J]. 海军航空工程学院学报, 2012, 27(2): 133-137.
 [10] WANG G, SUN X, ZHANG L, et al. Saturation attack based route planning and threat avoidance algorithm for cruise missiles[J]. Journal of Systems Engineering and

Electronic, 2012, 22(6): 948-953.
 [11] 汲万峰, 姜礼平, 朱建冲. 基于遗传算法的航路规划模型研究[J]. 军事运筹与系统工程, 2010, 24(2): 52-55.
 [12] 李子杰, 刘湘伟. 基于进化算法的多无人机协同航路规划[J]. 火力与指挥控制, 2015, 40(2): 85-89.
 [13] 田鹤, 李启华, 孟一鸣. 基于改进型遗传算法的舰艇航路规划研究[J]. 舰船电子工程, 2011, 31(10): 46-48.
 [14] 乔莎莎, 吴勇, 张建东, 等. 基于遗传算法和人工势场法的路径规划[J]. 现代电子技术, 2012, 35(12): 75-78.

业出版社, 2012: 40-41.
 [3] 曹小平, 路广安. 装备维修器材保障[M]. 北京: 国防大学出版社, 2005: 105.
 [4] 刘帅. 基于决策树和信息熵的属性约简算法研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2010.
 [5] 邓自洋. 改进决策树算法在高效就业管理中的应用研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2012.
 [6] 杨琦, 杨学强, 王张杰, 等. 基于决策树的装甲器材库存策略选择研究[J]. 军事物流, 2010(224): 141-143.
 [7] 黄泽波, 李占峰, 熊亮, 等. 基于故障树分析法与寻址技术的航空电源系统故障诊断系统[J]. 兵工自动化, 2018, 37(10): 51-56.
 [8] 石平. 基于决策树分类的成绩分析系统研究[J]. 长春师范大学学报, 2018(2): 56-59.
 [9] 周鹏. 数据挖掘技术下的智能化车辆管理系统实现[J]. 现代电子技术, 2016, 39(16): 52-54.
 [10] 王冬梅. 大数据背景下人工智能如何服务于政府经济决策[J]. 中国统计, 2017(4): 8-10.
 [11] 曹宏炳, 贾严冬. 战斗车辆乘员站综合集成设计[J]. 兵工自动化, 2018, 37(10): 13-16.
 [12] 胡迪·利普森, 梅尔巴·库曼. 无人驾驶[M]. 上海: 文汇出版社, 2017: 283.