

文章编号: 1674-8190(2022)05-156-07

基于逻辑决断图—主成分分析法的部署 备件包品种确定

刘挺¹, 柏林²

(1. 空军勤务学院 研究生大队, 徐州 221000)

(2. 空军勤务学院 航材四站系, 徐州 221000)

摘要: 部署备件包的建立对我军作战航材保障具有重要意义, 其首要问题是品种确定。从关键性、可更换性、寿控性、作战损伤性、可靠性、通用性、冗余结构、消耗性、经济性、筹措性10个因素出发, 提出维修部门使用逻辑决断图定性方法确定航材品种需求、航材部门进一步使用主成分分析法定量确定航材品种配置策略的部署备件包品种确定方法, 并通过实例验证该方法。结果表明: 基于逻辑决断图—主成分分析法能快速、合理地确定部署备件包品种。

关键词: 部署备件包品种; 逻辑决断图; 主成分分析法

中图分类号: V267; E27

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2022.05.17

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Determination of Deployment Spare Parts Package Varieties Based on Logical Decision Diagram and Principal Component Analysis

LIU Ting¹, BO Lin²

(1. Graduate Brigade, Air Force Logistics Academy, Xuzhou 221000, China)

(2. Aviation Materials and Sizhan Department, Air Force Logistics Academy, Xuzhou 221000, China)

Abstract: The establishment of deployment spare parts package is of great significance to the support of combat aviation materials of our army, the primary problem is to determine the variety. Starting from 10 factors such as criticality, replaceability, life control, combat damage, reliability, universality, redundant structure, consumption, economy and financing, In this paper, it is put forward that the maintenance department uses the logical decision diagram qualitative method to determine the demand of aviation materials, and the aviation materials department further uses the principal component analysis method to determine the configuration strategy of aviation materials quantitatively, finally, the method is verified by an example. The results show that the method based on logical decision diagram and principal component analysis can quickly and reasonably determine the type of deployment spare parts package.

Key words: deployment spare parts package varieties; logical decision diagram; principal component analysis

收稿日期: 2022-01-10; 修回日期: 2022-03-30

通信作者: 刘挺, 1026251180@qq.com

引用格式: 刘挺, 柏林. 基于逻辑决断图—主成分分析法的部署备件包品种确定[J]. 航空工程进展, 2022, 13(5): 156-162.

LIU Ting, BO Lin. Determination of deployment spare parts package varieties based on logical decision diagram and principal component analysis[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(5): 156-162. (in Chinese)

0 引言

部署备件包的概念来源于美军F-35的全球备件保障模式,是供应商的一个小规模零部件供应库,它能提供充足的零部件供军方在合同规定时限内战时或应急使用^[1],但需要军方单独购买。部署备件包与我军战储有些类似,但又有区别。部署备件包由供应商提供,备件品种和数量可以灵活配置,满足不同用户、不同时段、不同地区的需要;而战储动用权限高、备件不能及时更新、品种数量固定难以变动,无法满足今后战场瞬息万变的局势需求。因此,我军建立部署备件包,意义重大。

建立部署备件包,备件品种确定是其首要问题,王铁宁等^[2]分析影响战时装备备件品种确定的因素,运用模糊综合评判(Fuzzy Analytic Hierarchy Process,简称FAHP)确定品种;Ren X等^[3]针对影响因素边界界定不清的问题,提出灰色理论研究备件品种;Jiang M等^[4]结合模糊综合评判和灰色理论的优点,提出基于层次分析法(Analytic Hierarchy Process,简称AHP)和灰色理论的组合研究方法;Zhang Z等^[5]针对AHP主观性强的问题,引入数据包络分析法(Data Envelopment Analysis,简称DEA)模型构建客观性的比较矩阵,使得评价方法更加科学;池阔等^[6]应用粗糙集系统决策,通过对决策表中备件属性数据进行挖掘,约简了属性并简化了品种确定决策规则;《备件供应规划要求》^[7]规定:进行损坏模式及影响分析(Damage Mode and Effect Analysis,简称DMEA),分析易损部位和损坏程度,确定战损备件品种;刘喜春^[8]以战伤抢修需求为分析重点,建立了战时航材重要度评价指标体系,并采用品质功能配置法(Quality Function Deployment,简称QFD)和模糊综合评判相结合的方法,确定了作战航材的重要度,以此为依据,进行航材配置决策;卜新旺等^[9]和季嘉伟等^[10]也以战伤抢修需求为重要依据,同时引入作战相关性、战时损耗性等因素,完善了作战航材重要度评价的指标体系。

以上方法本质上就是对航材品种指标得分进行排序,以经济或者其他因素为限制,最终确定航材品种。然而在品种指标选择时,有定性因素和定量因素,统一衡量难以实施,且各因素之间交叉重叠;在品种确定时只有航材部门,忽略了重要的

维修部门。

逻辑决断图可以快速决断定性问题,主成分分析法(Principal Component Analysis,简称PCA)可以综合各因素重叠部分,因此本文提出逻辑决断图—主成分分析法确定部署备件包品种,由维修部门根据逻辑决断图进行定性判断,再由航材部门根据主成分分析法进行综合评价,最终决策出部署备件包品种。

1 部署备件包品种确定的因素分析

(1) 关键性:指该零部件对飞机系统性能的影响程度,包含定量和定性分析,其定量分析依据严酷度划分,可从故障模式、影响及危害性分析(Failure Mode, Effect and Criticality Analysis,简称FMECA)查询。严酷度越低,关键性越低,配置的效果越差。严酷度设置标准如表1所示。

表1 严酷度等级评分准则^[11]
Table 1 Severity rating criteria^[11]

等级	故障影响的严重程度
1、2、3	不足以导致人员伤亡、飞机轻度损坏,但会导致非计划性维护或修理
4、5、6	导致人员中等程度伤害、飞机中等程度损坏、任务延误或降级
7、8	导致人员严重伤害、飞机严重损坏、任务失败
9、10	导致人员死亡、飞机损坏

其定性分析主要指该零件是否影响联合作战任务基本功能的完成,若影响则必须配置。

(2) 可更换性:指该备件进行维修更换的级别和难易程度,按照外场是否能更换来区分,外场不能更换的,部署备件包不配置。

(3) 寿控性:有寿命控制要求的一般都是重要器材,必须配置。

(4) 作战损伤性:作战时是否容易被敌方武器损伤,容易受到损伤的就需要配置。该因素应采用定量分析,但我军缺乏相关数据,改通过维修人员工作经验进行定性判断。

(5) 可靠性:是指产品在规定的条件和条件下,完成规定功能的能力。选取备件可用度衡量,可用度越小,产品越容易故障,配置的必要性越高。

(6) 通用性:各型飞机之间备件是否通用,能够保障的飞机型号越少,则配置该种备件的必要

性越高,用备件可保障机型数量计算。

(7) 冗余结构:冗余是指产品中具有多种手段执行同一规定功能的结构形式,冗余度为备份部件与总部件的比值^[12],冗余度越低,越需配置。

(8) 消耗性:备件年平均消耗数量,历史消耗多的越需要储备。

(9) 经济性:备件成本费用。成本过高和过低的备件都不适宜配置在部署备件包里,在两者之间的情况下,成本越高说明备件越贵重,越需配置。

(10) 筹措性:从提出备件申请到最终获得备件的时间。备件越不容易筹措,越需要配置,用筹措时间衡量。

以上因素大致可分为军事性因素(前7项)和经济性因素(后3项),军事效益是航材备件的根本属性,其比经济效益更重要,但军事效益受到经济效益牵绊,因此需两者统筹兼顾。

2 部署备件包品种确定方法

以上10种因素包含定性和定量分析,无法统一比较,因此本文采取逻辑决断图—主成分分析法确定部署备件包品种。

2.1 逻辑决断图

逻辑决断图由方框和矢线组成,决断的流程从决断图的顶部开始,由对问题的回答“是”或“否”确定分析流程的方向^[11]。部署备件包属于战时装备备件范畴,与作战对象、作战规模、作战样式、作战条件、作战环境有关。因此品种确定非常关键,应由维修部门和航材部门共同确定。

部署备件包品种确定流程如图1所示,在参考了文献[13]之后,按照重要程度依次确定以下4个问题进行筛选:

- (1) 是否影响联合作战任务基本功能完成?
- (2) 外场是否能更换?
- (3) 是否有寿命控制要求?
- (4) 作战是否易损伤?

以上问题依次从关键性、可更换性、寿控性和作战损伤性因素出发,更多是从备件机理、技术角度上提问,因此由维修部门根据历史经验回答,决

定配置和不配置哪些备件。但是实际中,因为其他客观原因导致不能全部配置,这时需要航材部门综合评价备件重要度。

前4个因素(包含第一个因素定性分析)由维修部门回答,后7个因素(包含第1个因素定量分析)由航材部门综合评价。这样的流程安排兼顾到各专业特性,避免了两个部门交叉重复工作,更符合实践操作。而且如果时间紧迫,可以直接略过航材评价步骤,能快速决策。

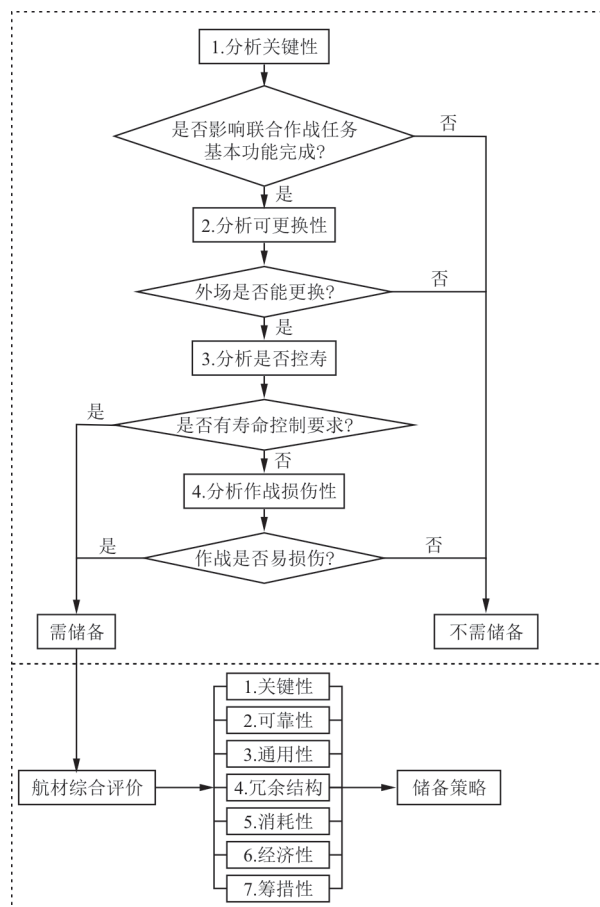


图1 部署备件包品种确定流程图

Fig. 1 Flow chart for determining the type of deployed spare parts package

2.2 主成分分析法

航材综合评价7个指标:关键性、可靠性、通用性、冗余结构、消耗性、经济性、筹措性。以上评价指标多且指标间的关系错综复杂,难以利用传统综合评价方法(模糊综合评价、AHP等),因此本文采用主成分分析法(PCA)。

主成分分析是利用降维的思想,把多指标转

化成为少数几个综合性指标,它能消除指标之间的相关关系,同时得到主要指标的权重值^[14],具体步骤如下:

(1) 样本数据标准化变换

设备件品种集合 $M = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$, 共 m 个品种; 影响备件品种的因素有 n 个, 则评价矩阵:

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

式中: i 为第几行; j 为第几列。

标准化数据矩阵 Y 为

$$Y = (y_{ij})_{m \times n} = [Y_1, Y_2, \dots, Y_n] \quad (2)$$

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{s_j} \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n)$$

$$\begin{cases} \bar{x}_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_{ij} \\ s_j = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_j)^2} \end{cases}$$

(2) 构建样本相关矩阵

$$\text{设相关矩阵 } R = (r_{ij})_{n \times n}, r_{ij} = \frac{1}{m-1} \sum_{t=1}^m y_{ti} y_{tj},$$

则

$$R = (r_{ij})_{n \times n} = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & \cdots & r_{nn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $r_{ij} = r_{ji}$, $r_{ii} = 1$, 因此 R 是对称矩阵, 主对角线上的元素均为 1。

求解矩阵 R 的特征值 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$, 特征向量 $L_1, L_2, \dots, L_n$:

$$L_j = (l_{1j}, l_{2j}, \dots, l_{nj})^T \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

(3) 按累计贡献率提取主成分

主成分贡献率计算公式为

$$b_j = \frac{\lambda_j}{\sum_{t=1}^n \lambda_t} \quad (5)$$

主成分累计贡献率计算公式为

$$\frac{\sum_{t=1}^k \lambda_t}{\sum_{t=1}^n \lambda_t} \geq 85\% \quad (6)$$

式中: k 为第几个主成分, 计算出 k , 并提取前 k 个主

成分。

$$Z_j = \sum_{t=1}^n l_{jt} Y_t \quad (j = 1, 2, \dots, k) \quad (7)$$

式中: Z_j 为得分矩阵。

(4) 用主成分进行综合评价

$$Z = \sum_{j=1}^k Z_j b_j \quad (8)$$

式中: Z 为得分值。

3 实例验证

某型飞机长期在某地执行任务, 常年伴随大量航材, 但使用率极低, 严重影响航材经济效益。为了提高保障能力, 现在当地组建部署备件包, 涉及备件编号为 1~14, 需从中筛选出重要备件进行部署, 现用逻辑决断图—主成分分析法进行配置。

3.1 逻辑决断图判断

逻辑决断过程如表 2 所示, 可以看出: 3、4、6、12 不需要配置, 1、2、5、7、8、9、10、11、13、14 需配置, 进行下一步主成分计算。

表 2 逻辑决断过程
Table 2 Logic decision process diagram

备件品种编号	逻辑推断过程				结论: 是否储备?
	A 关键性	B 可更换性	C 是否寿控	D 作战损伤性	
1	√	√	√	√	√
2	√	√	√	√	√
3	×	√	√	√	×
4	√	×	×	√	×
5	√	√	√	√	√
6	√	√	×	×	×
7	√	√	√	√	√
8	√	√	√	√	√
9	√	√	√	√	√
10	√	√	√	√	√
11	√	√	√	√	√
12	√	√	×	×	×
13	√	√	√	√	√
14	√	√	√	√	√

3.2 主成分分析计算

逻辑决断后的备件各项指标数据如表 3 所示,因计算公式复杂,本文采用 R 语言进行主成分分析。

表 3 备件各项指标数据
Table 3 Spare parts index data

备件品种编号	严酷度	可用度	可保障型号数量	冗余度	年平均消耗个数	价格/万元	筹措时间/天
1	9	0.73	3	0.50	7	5	13
2	10	0.90	1	0.25	3	6	10
5	7	0.60	2	0.20	6	3	15
7	5	0.70	3	0.25	5	7	20
8	3	0.50	1	0.25	4	11	30
9	4	0.60	1	0.50	3	6	20
10	2	0.70	2	0.25	2	4	15
11	1	0.75	1	0.20	4	8	10
13	1	0.95	1	0	5	4	20
14	1	0.83	2	0.20	6	5	10

各主成分方差的解释比率也叫做碎石图^[15],如图 2 所示,分别为 0.329、0.280、0.154、0.087、0.070、0.047、0.033。通过观察碎石图可以找到第 2 个点,在这个点上,下一个主成分解释的方差比例突然减少,这个点叫做肘,因此可以通过前两个主成分解释大部分方差。

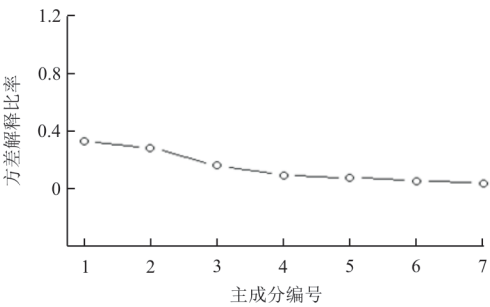


图 2 各主成分方差的解释比率图
Fig. 2 Explanatory ratio diagram of variance of each principal component

各主成分载荷向量计算结果如表 4 所示。

表 4 各主成分载荷向量
Table 4 Load vector of each principal component

影响因素	主成分向量						
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7
x1	-0.292 437 50	-0.399 359 7	0.408 566 38	-0.554 888 43	0.473 059 91	-0.101 094 4	0.214 845 87
x2	-0.354 996 51	0.503 573 6	0.116 984 74	-0.349 918 22	-0.091 821 23	-0.309 147 9	-0.616 651 73
x3	-0.397 151 39	-0.382 152 8	-0.361 042 86	0.274 419 65	-0.106 516 31	-0.690 137 0	0.054 194 73
x4	-0.032 895 13	-0.580 924 8	0.401 122 92	0.204 780 01	-0.317 422 63	0.217 417 0	-0.557 299 33
x5	-0.375 832 82	-0.190 248 0	-0.623 052 04	-0.375 112 51	-0.148 242 32	0.514 980 5	-0.080 445 39
x6	0.498 063 47	-0.167 100 2	-0.042 446 58	-0.553 427 03	-0.561 181 12	-0.296 306 9	0.114 913 40
x7	0.490 233 56	-0.198 227 8	-0.371 673 23	-0.073 649 23	0.564 606 32	-0.132 836 6	-0.490 291 47

第一主成分向量和第二主成分向量双标图(同时显示主成分得分和主成分载荷)如图 3 所示,将 7 种影响因素设为 x1、x2、x3、x4、x5、x6、x7,PC1 是第一主成分向量、PC2 是第二主成分向量,黑色的数字代表备件品种序号(编号重新排序)在前两个主成分的得分数值(图下方和左方的数轴),例如 1 号 PC1 得分为-2.141,矩阵 Z₁给出了具体得分数值;红色箭头表示前两个主成分的载荷向量(图上方和右方的数轴),例如 x1 在

PC1 载荷是-0.29,在 PC2 载荷是-0.39。分析 PC1,x6 和 x7 在 PC1 有较大权重(同载荷),其他变量权重较小,说明 PC1 主要解释价格和筹措时间;分析 PC2,x2 占较大权重,说明 PC2 主要解释可用度。

本文采用累计贡献率超过 85% 衡量,累计方差解释比率如图 4 所示,通过计算发现,前 4 个主成分累计贡献率达到 85%,因此采用前 4 个主成分解释,将原有 8 项指标约简为 4 个指标。

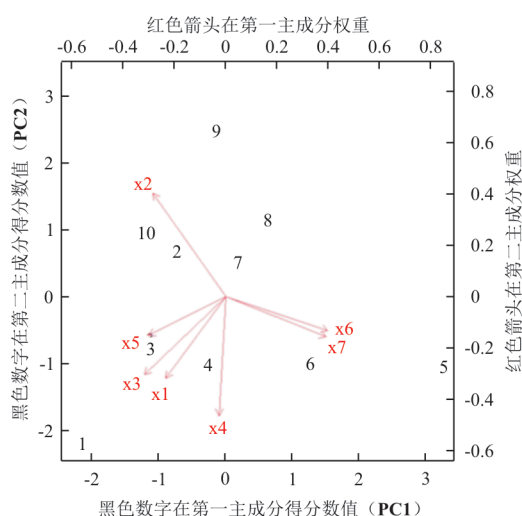


图3 双标图
Fig. 3 Biplot

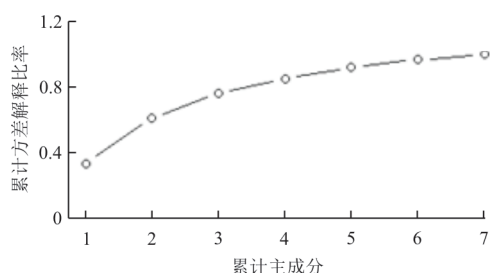


图4 累计方差解释比率

Fig. 4 Cumulative variance interpretation ratio

各主成分的得分矩阵:

$$Z_j = \begin{bmatrix} -2.141 & -2.229 & -0.116 & -0.357 \\ -0.706 & 0.685 & 2.075 & -1.216 \\ -1.123 & -0.608 & -0.535 & 0.235 \\ -0.218 & -0.995 & -0.968 & -0.054 \\ 3.294 & -1.029 & -0.766 & -0.719 \\ 1.294 & -0.985 & 1.193 & 0.756 \\ 0.211 & 0.557 & 0.636 & 1.589 \\ 0.657 & 1.147 & 0.291 & -0.140 \\ -0.125 & 2.512 & -0.996 & -0.323 \\ -0.145 & 0.945 & -0.814 & 0.231 \end{bmatrix}$$

$$b_j = \begin{bmatrix} 0.329 \\ 0.280 \\ 0.154 \\ 0.087 \end{bmatrix}$$

最后得分:

$$Z = \begin{bmatrix} -1.377 \\ 0.173 \\ -0.602 \\ -0.504 \\ 0.615 \\ 0.399 \\ 0.462 \\ 0.570 \\ 0.481 \\ -0.217 \end{bmatrix}$$

备件评估结果如表5所示。

表5 备件品种配置评估结果

Table 5 Evaluation results of spare parts configuration

备件品种编号	评估分数	决策方案
8	0.615	配置
11	0.570	
13	0.481	
10	0.462	
9	0.399	
2	0.173	
14	-0.217	不配置
7	-0.504	
5	-0.602	
1	-1.377	

部署备件包品种可按照此评估结果进行选择,根据不同策略,进行不同配置。表5给出了一种配置策略:评估分数为负数的不配置。

将结果与实际情况进行对比验证,8号备件评估分数最高,1号备件最低,对比分析备件指标数据发现,8号备件严酷度低于1号备件、年平均消耗个数接近1号备件,其余5项配置影响指标均重要于1号备件,因此8号配件更需配置,与实际情况相符。

4 结 论

(1) 本文创新综合了维修和航材两个部门,提出的逻辑决断图—主成分分析法很好地处理了定性和定量指标,解决了快速决策和指标冗余问题,使得部署备件包品种确定结果更具信服力。

(2) 本文依据10个影响因素建立备件品种指标体系,并且给出了灵活的配置方案,为装备精确

保障提供了新思路、新方法。

参考文献

- [1] 任淑霞, 范灵, 宋可为. F-35 飞机全球备件保障模式研究[J]. 航空维修与工程, 2020(4): 14-16.
REN Shuxia, FAN Ling, SONG Kewei. Research on global spare parts support mode of F-35 aircraft[J]. Aviation Maintenance and Engineering, 2020(4): 14-16. (in Chinese)
- [2] 王铁宁, 于双双, 李宁. 战时装备备件品种确定方法研究[J]. 物流科技, 2012(9): 91-95.
WANG Tiening, YU Shuangshuang, LI Ning. Study on determination method of spare parts for wartime equipment[J]. Logistics Technology, 2012(9): 91-95. (in Chinese)
- [3] REN X, ZHAO J J, LI B. Spare parts varieties level configuration based on grey situation decision[C]// The 26th Chinese Control and Decision Conference. Changsha, China: IEEE, 2014: 2241-2243.
- [4] JIANG M, MA S S, YANG S Y. Research on the confirm method for new system radar spare parts based on gray AHP[C]// International Conference on Modern Engineering Solutions for the Industry. Wuhan, China: IEEE, 2015: 735-744.
- [5] ZHANG Z, RUI K, QU L, et al. Method of determining spares varieties based on AHP and DEA[C]// The 8th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety. Chengdu, China: IEEE, 2009: 590-593.
- [6] 池阔, 康建设, 王广彦, 等. 基于完备相容 Rough 决策表的备件品种确定方法[J]. 火力与指挥控制, 2015, 40(10): 107-111.
CHI Kuo, KANG Jianshe, WANG Guangyan, et al. Spare parts variety determination method based on complete compatible rough decision table[J]. Fire Control and Command, 2015, 40(10): 107-111. (in Chinese)
- [7] 中国人民解放军总装备部. 备件供应规划要求: GJB 4355—2002[S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2003.
General Armament Department of the Chinese People's Liberation Army. Spare parts supply planning requirements: GJB 4355—2002[S]. Beijing: Military Standard Publishing and Distribution Department of General Equipment Department, 2003. (in Chinese)
- [8] 刘喜春. 不确定需求下航空备件多阶段供应保障规划模型及动态协调机制研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009.
LIU Xichun. Research on multi-stage supply support planning model and dynamic coordination mechanism of aviation spare parts under uncertain demand[D]. Changsha: National University of Defense Science and Technology, 2009. (in Chinese)
- [9] 卜新旺, 张扬, 杨一帆. 基于综合模糊评价法的修复性维修备件确定优化研究[J]. 价值工程, 2016, 10(10): 125-128.
BU Xinwang, ZHANG Yang, YANG Yifan. Research on optimization of repair maintenance spare parts based on comprehensive fuzzy evaluation method[J]. Value Engineering, 2016, 10(10): 125-128. (in Chinese)
- [10] 季嘉伟, 孙国文, 罗嘉伟. 基于模糊综合评判的电源车战场抢修备件品种研究[J]. 装备制造技术, 2017, 12(7): 214-216.
JI Jiawei, SUN Guowen, LUO Jiawei. Research on spare parts for battlefield emergency repair of power vehicle based on fuzzy comprehensive evaluation[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2017, 12(7): 214-216. (in Chinese)
- [11] 康锐. 可靠性维修性保障性工程基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
KANG Rui. Fundamentals of reliability, maintainability and supportability Engineering[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014. (in Chinese)
- [12] 张闯, 刘福胜, 单志伟, 等. 一体化装备保障备件品种确定方法[J]. 装甲兵工程学院学报, 2018, 32(3): 30-34. (in Chinese)
ZHANG Chuang, LIU Fusheng, SHAN Zhiwei, et al. Determination method of spare parts for integrated equipment support[J]. Journal of Armored Force Engineering College, 2018, 32(3): 30-34. (in Chinese)
- [13] 郭峰, 王德心. 航空装备维修器材筹措供应标准研究[M]. 北京: 国防工业出版社, 2020.
GUO Feng, WANG Dexin. Research on financing and supply standard of aviation equipment maintenance equipment[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2020. (in Chinese)
- [14] 陶长琪, 盛积良. 决策理论与方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2016.
TAO Changqi, SHENG Jiliang. Decision theory and method[M]. Beijing: Higher Education Press, 2016. (in Chinese)
- [15] 加雷斯·詹姆斯, 丹妮拉·威滕, 特雷弗·哈斯特. 统计学习导论——基于 R 应用[M]. 王星, 译. 北京: 机械工业出版社, 2017.
JAMES G, WITTEN D, HASTIE T, et al. Introduction to statistical learning—application based on R[M]. Translated by WANG Xing. Beijing: China Machine Press, 2017. (in Chinese)

作者简介:

刘 挺(1992—),男,硕士研究生。主要研究方向:控制科学与工程,航材。

柏 林(1963—),男,硕士,教授。主要研究方向:航材。

(编辑:马文静)