

基于改进灰色关联度的弹药航空适运性评价指标体系构建

颉正阳^a, 安红^b, 陈思杨^c

(空军勤务学院 a.学员一大队; b.基础部; c.航空军交运输指挥系, 江苏 徐州 221000)

摘要: 针对弹药航空运输适运性评价的问题, 首先分析弹药航空运输的特点和航空适运性影响因素, 建立初始评价指标体系; 然后, 采用改进灰色关联度模型对弹药航空适运性初始评价指标体系进行优化, 经过灰色关联分析, 删除与适运性评价目标关联不强的指标, 采用德尔菲法对指标优劣排序进行调整, 并利用相关性分析法去掉相关性较强的指标。得到优化的弹药航空适运性评价指标体系, 兼顾了指标的主观性和客观性。最后, 通过实例验证了模型的有效性和实用性。

关键词: 弹药; 航空适运性; 评价指标体系; 改进灰色关联度

DOI: 10.7643/ issn.1672-9242.2017.09.004

中图分类号: TJ01; E234 文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2017)09-0016-06

Construction of Evaluation Index System about Ammunition Air Transportation Fitness Based on Improved Grey Relational Degree

JIE Zheng-yang^a, AN Hong^b, CHEN Si-yang^c

(Air Force Logistics College a.Cadet Brigade 1; b.Department of Basic;

c.Department of Airway Military Transportation Command System, Xuzhou 221000, China)

ABSTRACT: The paper aims to evaluation the ammunition air transportation fitness. Firstly, the ammunition air transportation characteristics and the influencing factors of air transportation fitness were analyzed, and an initial evaluation index system was built. Secondly, the evaluation index system for ammunition air transportation fitness was optimized based on the model of the improved grey relational degree. After the grey correlation analysis, the indexes without strong correlation with the evaluation goal were removed. The order of indexes was adjusted with Delphi method, and the indexes with strong correlation were removed by correlation analysis. An optimized evaluation index system about ammunition air transportation fitness was got. It gave consideration to the subjectivity and objectivity of indexes. Finally, the validity and practicality of the model were tested and verified in a case study.

KEY WORDS: ammunition; air transportation fitness; evaluation index system; improved grey relational degree

以往弹药大多数通过公路、铁路方式进行运输, 运输时间比较长, 不能满足越来越多的部队应急机动作战要求。随着大型运输机的部队列装, 我军空中投

送能力将会得到极大的提升, 通过航空方式运送弹药, 既快捷、又高效, 已经逐渐成为中长距离弹药运输的重要方式之一。目前我军弹药航空军事运输尚处

在起步阶段, 弹药的航空适运性不清楚, 能否使用军用运输机运输弹药成为首先要解决的难题。因此, 有必要建立弹药航空适运性评价指标体系。

航空适运性^[1], 又称航空运输性, 是指装备适应航空运输的固有能力, 包括适应航空基础设施、航空载运工具和航空运输环境等。我国在适运性研究方面尚处在起步探索阶段, 关于适运性评价指标体系的研究有限。吴刚等人^[2]运用灰色关联度法和层次分析法建立了运输性评价模型。王传义等^[3]对铁路运输中军事装备运输性的影响因素进行系统分析, 建立了运输性评价指标体系, 并运用灰色关联分析建立了运输性评价的数学模型。王会云^[4]构建了加权灰色关联决策分析模型, 对备选后方储备中心进行选择。综合来看, 大部分文献是对评价对象进行评价, 而构建指标体系的文献相对较少。弹药航空适运性指标既有定性指标又有定量指标, 并且指标间没有确定的数量关系, 是一种灰色系统。

文中针对灰色关联度法在建立指标体系时只注重数据而不结合实际的缺点, 提出一种基于改进灰色关联度的弹药航空适运性评价指标体系构建方法, 将定性与定量分析相结合, 建立更加符合实际的指标体系, 指导人们解决弹药航空适运性分析的问题。

1 初始评价指标体系建立

1.1 弹药航空运输特点

弹药采用航空运输, 可实现直达供应、快速支援, 具有速度快、保密性强、受外界干扰小等特点, 具有公路、铁路等运输方式不具有的便捷性。

弹药是指装有火炸药及其他装填物, 能对目标起毁伤作用或实现其他用途的装备, 包括枪弹、炮弹、火箭弹、手榴弹、枪榴弹、地雷、航空弹药和舰艇弹药等。从定义中就能看出, 不同于航空运输的其他货物, 弹药在航空运输中具有意外起火、喷射、爆炸等潜在危险性, 能够威胁到机组生命安全、飞机安全, 造成重大人员伤亡和财产损失。不单单在运输途中, 在弹药装卸飞机的过程中, 若不注意也会造成危险, 是需要特殊对待的一类空运装备。

1.2 影响因素分析

1) 内部影响因素: 内部影响因素主要指弹药自身的物理、化学性质和包装。物理性质主要是指弹药的质量、重心、尺寸等的影响, 比如某些弹药过于集中而超过机舱地板承重限制; 化学性质主要指弹药在化学变化中表现出来的性质, 比如可燃、放热、爆炸等; 包装对于弹药的安全运输具有重要的作用, 包装的材质、构造均能够影响弹药的安全, 一个满足要求的包装能够更好地保护弹药, 降低发生危险的概率,

也就是提高了其航空适运性。

2) 外部影响因素: 外部影响因素主要包括载运工具、运输环境和装卸要求。载运工具因素主要指运输机自身的布局尺寸要求、货舱地板(集装箱)的载荷限制(包括轴负荷、接地比压等)、货舱地板的固定与系留要求(包括系留的位置、数量、强度以及限动过载要求); 运输环境主要指弹药在航空运输过程中所遇到的机械、气候环境影响, 其中机械环境包括振动、冲击、稳态加速度和静负载等因素, 气候环境包括货舱温度(高温、低温和温度变化)、湿度、低气压等, 弹药可能因其影响而造成失效、起火、爆炸等危险; 装卸要求主要指待装货物适应不同装卸方式的要求, 根据货物的尺寸质量, 装卸方式主要有滚装滚卸(装备货物自行装卸)、吊装吊卸(采用机上吊具)、升降装卸(采用升降装卸平台)、牵引装卸(以电动绞车或牵引车为动力)。

1.3 建立弹药航空适运性初始评价指标体系

根据弹药航空运输特点和弹药航空适运性影响因素, 以及相关文献、部队实践的总结和专家指导意见, 遵循全面性、实用性、代表性、科学性和可靠性的原则, 建立了弹药航空适运性初始评价指标体系, 如图 1 所示。

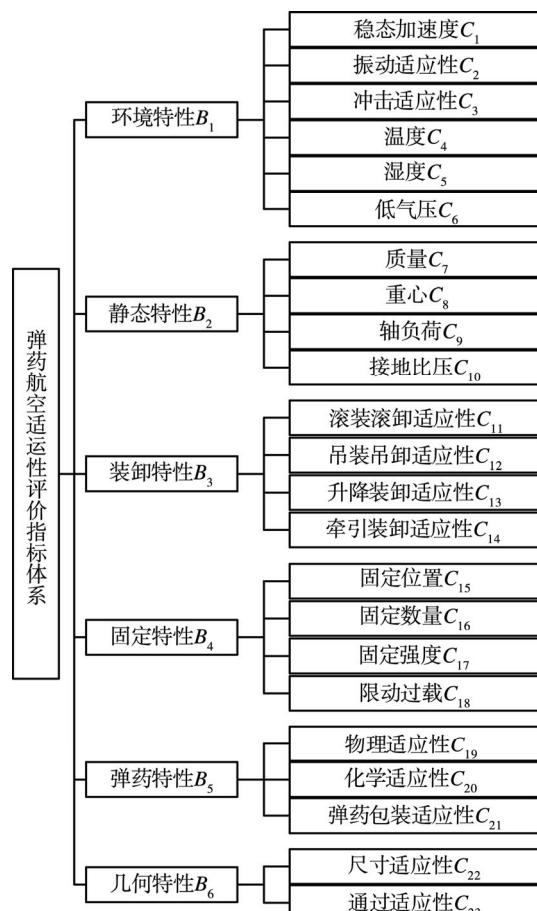


图 1 弹药航空适运性初始评价指标体系

2 初始评价指标体系优化

建立的初始评价指标体系较为全面，但存在某些指标所含信息相似、指标的重要性无法区分、某些指标不适用于弹药的问题，需要对所建立的初始评价指标体系进行优化。

2.1 初始指标值的获取和标准化

弹药航空适运性初始评价指标体系中既有定性指标，又有定量指标。对于定性指标，比如“滚装滚卸适应性”等，可采用德尔菲法^[5-6]确定其指标值；对于定量指标，比如“稳态加速度”等，根据具体实际获取指标值。

为消除不同指标的量纲不同的影响，需要对获取的指标值进行标准化处理。对于正向指标来说，比如“尺寸适应性”，要求越大越好；对于负向指标来说，比如“接地比压”，要求越小越好。正向指标和负向指标的标准化式分别为：

$$b_{ij} = x_{mk} / \max_m(x_{mk}) \quad (1)$$

$$b_{ij} = \min_m(x_{mk}) / x_{mk} \quad (2)$$

式中： x_{mk} 为第 m 个评价对象第 k 个评价指标的实测数值； $\max_m(x_{mk})$ ， $\min_m(x_{mk})$ 分别为 n 个评价对象中指标实测数值的相对最优值。

2.2 改进灰色关联度模型的建立

为弥补灰色关联度模型在指标体系建立过程中只分析数据不考虑实际的缺点，采用基于德尔菲法和相关性分析法的改进灰色关联度模型，进一步得到筛选完善的评价指标体系。

2.2.1 灰色关联度模型的建立

对于一个系统来说，如果能够看清其内部的信息，称这个系统为“白色系统”；如果无法了解其内部的信息，则称其为“黑色系统”^[7]。“灰色系统”正是介于这两个系统之间，也就是只了解这个系统中的一部分信息。

灰色关联度表示系统中指标之间的关联程度，注重挖掘系统内部的联系。灰色关联度模型的基本思想^[8]就是根据标准指标序列和实际指标序列曲线几何形状的相似程度来判断指标与评价目标的联系是否紧密，以此为依据判断指标的取舍。灰色关联度模型的建立步骤^[9-10]如下：

1) 确定参考数列和比较数列。分别为：

$$X_0 = \{x_0(1), x_0(2), \dots, x_0(c)\}$$

$$X_m = \{x_m(1), x_m(2), \dots, x_m(c)\}$$

式中： $x_0(k)$ 为第 k 个评价指标的最优数值， x_{mk} 为第 m 个评价对象第 k 个评价指标的实测数值。

2) 求指标关联系数。首先求得各指标实测值 $x_0(k)$ 与最优值 $x_0(k)$ 的差值，得到差值矩阵 A ：

$$A = \begin{bmatrix} \Delta_1(1) & \cdots & \Delta_1(n) \\ \vdots & & \vdots \\ \Delta_c(1) & \cdots & \Delta_c(n) \end{bmatrix}$$

式中： $\Delta_k(m)$ 表示第 m 个评价对象第 k 个指标与相应最优值的差值。

找出 A 中的最大值和最小值分别记为 Δ_{\max} 和 Δ_{\min} ，由关联系数式：

$$\varepsilon_m(k) = \frac{\Delta_{\min} + \lambda \Delta_{\max}}{\Delta_k(m) + \lambda \Delta_{\max}} \quad (3)$$

式中： λ 为分辨系数，影响 $\varepsilon_m(k)$ 的大小和分辨率，一般取值为 0.5，可得到关联系数矩阵 B ：

$$B = \begin{bmatrix} \varepsilon_1(1) & \cdots & \varepsilon_1(n) \\ \vdots & & \vdots \\ \varepsilon_c(1) & \cdots & \varepsilon_c(n) \end{bmatrix}$$

3) 求指标关联度。根据关联度的大小可得到指标的优劣顺序，计算关联度为：

$$r_k = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n \varepsilon_k(m) \quad (4)$$

最终可得到指标的关联度矩阵 R ：

$$R = [r_1, \dots, r_c]$$

2.2.2 德尔菲法调整指标排序

德尔菲法又称专家调查法，通过对多名专家的问卷调查与反馈得到对某一问题的主观认识^[11]，是预测问题中一种有效研究方法。德尔菲法调整指标排序的步骤如下^[5-6]：

1) 选取专家。选取 l 名专家，专家应在本研究领域内具有一定学术水平，能够准确反映指标的重要程度。

2) 专家对评价指标进行评分。按照 0~100 的分值区间进行评分，评分过程要客观公正，必要时可对指标评分加以说明。最后将结果进行标准化处理，得到专家评分矩阵 C ：

$$C = \begin{bmatrix} w_{11} & \cdots & w_{1c} \\ \vdots & & \vdots \\ w_{l1} & \cdots & w_{lc} \end{bmatrix}$$

3) 计算 l 名专家对每个指标的评分均值：

$$f_k = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l w_{ik} \quad (5)$$

4) 结合关联度 r_k ，计算 τ_k ：

$$\tau_k = f_k r_k \quad (6)$$

将计算结果进行排序，得到指标排序矩阵 $D = [\tau(1), \dots, \tau(c)]$ 。

2.2.3 相关性分析剔除重复指标

经过德菲尔法的分析后，指标体系得到了调整，

但是经过灰色关联度分析和德尔菲法调整后得到的指标排序只是各指标与评价目标之间的关联性的排序，没有考虑指标之间的相关性，导致两个相关性大的指标都保留，造成包含信息重复的问题。

相关性分析^[12]是对两个变量之间的关系程度进行分析，它以相关系数作为这两个变量之间相关强弱程度的度量。相关系数有三种，分别为 Pearson 积距相关系数（指标是定距数据、正态分布和线性关系）、Spearman 秩相关系数和 Kendall 相关系数（分类指标为有序变量）。文中指标数值的分布未知，且为无序指标，故采用 Spearman 秩相关系数确定指标之间的相关性。两个指标之间的相关系数为：

$$\theta = \frac{\sum_{m=1}^n (r_m - \bar{r})(s_m - \bar{s})}{\sqrt{\sum_{m=1}^n (r_m - \bar{r})^2 (s_m - \bar{s})^2}} \quad (7)$$

式中： r_m 是第 m 个评价对象关于指标 r 的秩； s_m 是第 m 个评价对象关于指标 s 的秩； n 为评价对象的个数， \bar{r} ， \bar{s} 分别为 r_m ， s_m 的平均值。

相关系数 θ 的取值范围^[13]为 $[-1, 1]$ ， $\theta=0$ 表示指标间不存在相关关系； $|\theta|>0.8$ 表示指标间存在较强的相关关系； $|\theta|<0.3$ 表示指标间相关关系较弱。

3 实例分析

为构建完善的弹药航空适运性评价指标体系，现选取四种不同种类弹药（分别用 A, B, C, D 来代表）的各项指标数据，采用改进的灰色关联度模型对初始评价指标体系进行筛选优化。

3.1 指标值的获取

根据四种弹药航空适运性评价各指标相关数据以及专家的打分情况，得到各指标的原始值，再由式

$$A = \begin{bmatrix} 0.195 & 0.786 & 0.887 & 0.621 & 0.450 & 0.105 & 0.064 & 0.100 & 0.988 & 0.179 & 0.901 \\ 0.229 & 0.813 & 0.885 & 0.879 & 0.426 & 0.224 & 0.101 & 0.127 & 0.977 & 0.323 & 0.955 \\ 0.212 & 0.108 & 0.660 & 0.601 & 0.223 & 0.751 & 0.113 & 0.080 & 0.997 & 0.109 & 0.856 \\ 0.171 & 0.501 & 0.641 & 0.422 & 0.870 & 0.319 & 0.093 & 0.121 & 0.990 & 0.044 & 0.984 \end{bmatrix}$$

A 中最大值为 0.997，最小值为 0.026，由式（3）得到关联系数矩阵 B ：

$$B = \begin{bmatrix} 0.756 & 0.408 & 0.396 & 0.553 & 0.553 & 0.869 & 0.932 & 0.876 & 0.353 & 0.774 & 0.375 & 0.735 & 1 & 0.375 & 0.976 & 0.994 & 0.911 & 0.771 & 0.693 & 0.551 & 0.401 & 0.833 & 0.346 \\ 0.721 & 0.400 & 0.385 & 0.381 & 0.567 & 0.726 & 0.875 & 0.839 & 0.355 & 0.638 & 0.361 & 0.662 & 0.847 & 0.414 & 0.946 & 0.937 & 0.863 & 0.740 & 0.637 & 0.527 & 0.398 & 0.836 & 0.334 \\ 0.738 & 0.865 & 0.487 & 0.477 & 0.727 & 0.808 & 0.856 & 0.907 & 0.351 & 0.863 & 0.454 & 0.525 & 0.735 & 0.598 & 0.879 & 0.878 & 0.835 & 0.913 & 0.821 & 0.716 & 0.858 & 0.856 & 0.529 \\ 0.783 & 0.525 & 0.459 & 0.570 & 0.383 & 0.642 & 0.887 & 0.847 & 0.352 & 0.967 & 0.354 & 0.835 & 0.876 & 0.502 & 0.996 & 0.907 & 0.824 & 0.885 & 0.680 & 0.441 & 0.438 & 0.941 & 0.354 \end{bmatrix}$$

根据式（4），可得评价指标的关联度矩阵 R ：

$$R = [0.750 \ 0.550 \ 0.447 \ 0.495 \ 0.558 \ 0.761 \ 0.888 \ 0.867 \ 0.353 \ 0.811 \ 0.386 \ 0.689 \ 0.865 \ 0.472 \ 0.949 \ 0.929 \ 0.858 \ 0.827 \ 0.708 \ 0.559 \ 0.528 \ 0.867 \ 0.432]$$

可得指标的相关度由大到小排序为： C_{15} , C_{16} , C_7 , C_8 , C_{22} , C_{13} , C_{17} , C_{18} , C_{10} , C_6 , C_{19} , C_{12} , C_{20} , C_5 , C_2 , C_{21} , C_4 , C_{14} , C_3 , C_{23} , C_{11} , C_9 。根据各指标关联度的大小，可以将以下与适运性评价目标关联度比较小的指标剔除： C_9 , C_{11} ,

(1), (2) 进行指标标准化，得到四种弹药各指标的标准化数值，见表 1。

表 1 弹药航空适运性评价指标标准化值

指标	A	B	C	D
C_1	0.805	0.771	0.788	0.805
C_2	0.214	0.187	0.892	0.499
C_3	0.112	0.114	0.332	0.357
C_4	0.379	0.121	0.399	0.578
C_5	0.550	0.574	0.777	0.130
C_6	0.895	0.776	0.249	0.681
C_7	0.936	0.899	0.887	0.907
C_8	0.900	0.873	0.920	0.879
C_9	0.012	0.023	0.003	0.010
C_{10}	0.821	0.677	0.891	0.956
C_{11}	0.099	0.045	0.144	0.016
C_{12}	0.785	0.706	0.700	0.870
C_{13}	0.974	0.879	0.785	0.896
C_{14}	0.101	0.231	0.121	0.454
C_{15}	0.961	0.944	0.899	0.972
C_{16}	0.971	0.939	0.901	0.920
C_{17}	0.923	0.891	0.870	0.862
C_{18}	0.818	0.790	0.924	0.906
C_{19}	0.742	0.675	0.860	0.727
C_{20}	0.546	0.503	0.766	0.310
C_{21}	0.192	0.180	0.887	0.302
C_{22}	0.869	0.871	0.886	0.941
C_{23}	0.024	0.017	0.775	0.053

3.2 指标灰色关联度分析

确定四种弹药各指标的参考数列： $X_0=\{1, 1, \dots, 1\}$ ；以及比较数列： X_1 , X_2 , X_3 , X_4 ，数列中的指标值由表 1 给出。然后计算参考数列和比较数列相对应指标的差值，得到差值矩阵 A ：

3.3 指标的筛选优化

选取弹药航空运输领域内的 5 名专家对剩余指标进行评分，得到专家评分矩阵 C ：

$$C = \begin{bmatrix} 0.666 & 0.883 & 0.871 & 0.667 & 0.563 & 0.687 & 0.903 & 0.933 & 0.699 & 0.691 & 0.802 & 0.594 & 0.853 & 0.809 & 0.796 & 0.849 & 0.974 & 0.986 & 0.922 & 0.892 \\ 0.598 & 0.877 & 0.864 & 0.783 & 0.664 & 0.700 & 0.918 & 0.891 & 0.740 & 0.778 & 0.876 & 0.557 & 0.841 & 0.795 & 0.844 & 0.742 & 0.960 & 0.945 & 0.945 & 0.886 \\ 0.705 & 0.860 & 0.852 & 0.559 & 0.703 & 0.733 & 0.910 & 0.896 & 0.621 & 0.812 & 0.858 & 0.683 & 0.826 & 0.811 & 0.820 & 0.690 & 0.952 & 0.997 & 0.973 & 0.889 \\ 0.634 & 0.892 & 0.881 & 0.770 & 0.774 & 0.689 & 0.897 & 0.900 & 0.775 & 0.762 & 0.809 & 0.664 & 0.820 & 0.733 & 0.794 & 0.777 & 0.991 & 0.968 & 0.927 & 0.894 \\ 0.629 & 0.873 & 0.860 & 0.701 & 0.691 & 0.694 & 0.927 & 0.890 & 0.713 & 0.825 & 0.811 & 0.580 & 0.819 & 0.754 & 0.801 & 0.724 & 0.952 & 0.982 & 0.919 & 0.861 \end{bmatrix}$$

按照式(5)、(6)进行计算,得到最终专家评分矩阵 C' :

$$C' = [0.485 \ 0.682 \ 0.670 \ 0.346 \ 0.379 \ 0.533 \ 0.809 \ 0.782 \ 0.575 \ 0.533 \ 0.719 \ 0.291 \ 0.789 \ 0.725 \ 0.388 \ 0.626 \ 0.829 \ 0.845 \ 0.815 \ 0.767]$$

将评分结果排序,再和灰色关联度排序结果进行对比,得到优化的评价指标排序结果为: $C_{20}, C_{19}, C_{21}, C_7, C_8, C_{22}, C_2, C_3, C_{15}, C_{16}, C_{17}, C_{18}, C_{10}, C_6, C_1, C_{12}, C_5, C_4, C_{14}$ 。利用 Spss 数据分析软件^[14]对 20 个指标进行相关性分析,采用双侧检验得到各指标之间的相关性系数。以“物理适应性”和“振动适应性”为例进行介绍,得到两个指标的 Spearman 秩

相关系数,见表 2。虽然两个指标之间的相关性系数为 0.800,但是显著性水平为 0.200,大于 0.05,可知指标“物理适应性”和“振动适应性”之间显著不相关。依次可得到各指标之间的相关性系数,相关性分析结果显示,“物理适应性”和“尺寸适应性”、“重心”、“质量”、“接地比压”之间显著相关,故将“物理适应性”指标剔除。

表 2 指标相关性分析结果

			物理适应性	振动适应性
Spearman's rho	物理适应性	Correlation Coefficient	1.000	0.800
		Sig.(2-tailed)	0.0	0.200
		N	4	4
	振动适应性	Correlation Coefficient	0.800	1.000
		Sig.(2-tailed)	0.200	0.0
		N	4	4

3.4 最终评价指标体系的确定

根据灰色关联度分析、德尔菲法和指标相关性分析的优化,最终得到弹药航空适运性评价指标体系,如图 2 所示。

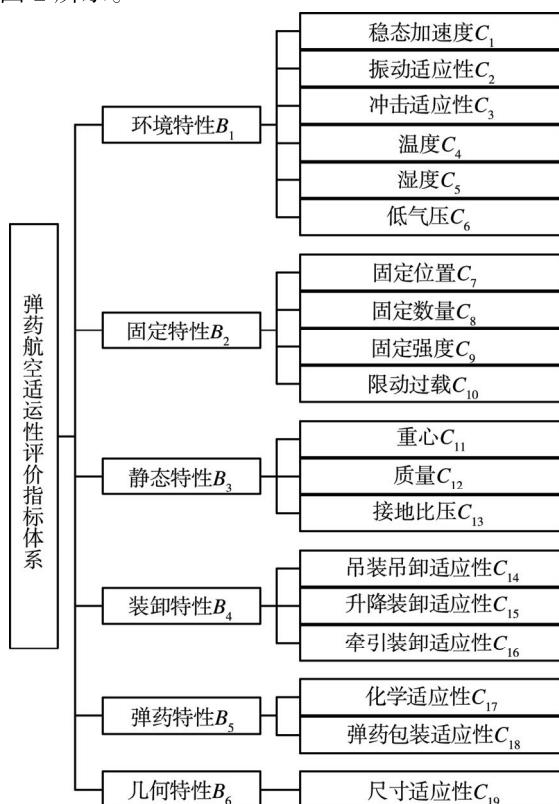


图 2 弹药航空适运性最终评价指标体系

4 结语

通过改进灰色关联度模型对初始评价指标体系进行优化,最终构建的弹药航空适运性评价指标体系兼顾了客观性、主观性与实用性,而且指标的重要程度排序一目了然,为部队进行弹药航空适运性评价提供了较为可信的指标体系。但也存在以下问题,实例分析中选取的指标数据较少,导致指标的相关性分析精确度偏低,这是下一步需要改进的地方。

参考文献:

- [1] MIL-STD-1366D, Interface standard for Transportability criteria[S].
- [2] 吴刚, 刘将. 基于灰色关联度法的运输性评价模型[J]. 装备指挥技术学院学报, 2008, 19(4): 38-42.
- [3] 王传义, 高立军, 段志浩. 铁路运输中军事装备运输性评价研究[J]. 国防交通工程与技术, 2013(5): 38-43.
- [4] 王会云. 基于熵权灰色关联分析的储备中心库选择[J]. 后勤工程学院学报, 2016, 32(1): 64-68.
- [5] 刘伟涛, 顾鸿, 李春洪. 基于德尔菲法的专家评估法在海战效能评估中的应用[J]. 海军学术研究, 2011(5): 31-33.
- [6] SCHMIDT R, LYTTINEN K, KEIL M, et al. Identifying Software Project Risks: An International Delphi Study[J]. Journal of Management Information Systems, 2001, 17(4):

- 5-36.
- [7] 邓聚龙. 灰色系统理论与教程[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1990: 21-30.
- [8] 刘思峰, 党耀国, 方志耕. 灰色系统理论及其应用(第三版)[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 15-22.
- [9] 雷蕾, 谭跃进. 招标方法的适用性研究[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2003, 4(3): 87-91.
- [10] 王琦. 我国国有石油公司天然气业务国际竞争力研究——基于 AHP-灰色关联度模型[J]. 甘肃科学学报, 2015, 27(2): 134-137.
- [11] 秦麟征. 预测科学——未来研究学[M]. 北京: 方志出版社, 2007: 142-167.
- [12] JOHN A R. Mathematical Statistics and Data Analysis [M]. Duxbury Press, 1994: 421-427.
- [13] 冯杰, 罗云, 曾珠, 等. 特种设备安全绩效与安全监管能力相关性研究[J]. 中国安全科学学报, 2012, 22(2): 170-175.
- [14] 李洪成. SPSS18 数据分析基础与实践[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011: 35-53.