

文章编号:1674-8190(2022)02-143-07

民用飞机航材支援网络选址因素权衡方法研究

魏严锋¹, 乔琳君²

(1. 中航西飞民用飞机有限责任公司 客户服务中心, 西安 710089)

(2. 西安航空职业技术学院 自动化工程学院, 西安 710089)

摘要: 民用飞机航材支援网络作为主制造商为客户提供航材的必要媒介,合理地搭建该航材支援网络有利于提高主制造商的服务品质和客户运营能力。基于Kriging方法,提出一种定性与定量相结合的民用飞机航材支援网络选址因素权衡方法,对选址因素进行梳理和分类,获取选址定量分析数据需求,并运用所提方法进行民用飞机航材支援网络选址因素权衡,进而对选址因素进行重要度评价;将该方法与层次分析法、响应面法、蒙特卡洛法进行对比分析,以验证其有效性和适用性。结果表明:本文所提方法可有效进行选址因素重要度评价,为民用飞机航材支援网络的搭建奠定基础。

关键词: 民用飞机;航材支援网络;因素权衡;Kriging模型;重要度评价

中图分类号: V267

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2022.02.21

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on the Factors Weighting Method in the Site Selection of Civil Aircraft Spare Parts Support Network

WEI Yanfeng¹, QIAO Linjun²

(1. Customer Service Centre, AVIC XAC Commercial Aircraft Co., Ltd., Xi'an 710089, China)

(2. School of Automation Engineering, Xi'an Aeronautical Polytechnic Institute, Xi'an 710089, China)

Abstract: The civil aircraft spare parts support network is a necessary medium for the main manufacturer to provide customers with aviation materials. The rationality of its construction is conducive to improving the service quality of the main manufacturer and the customer's operational capability. Based on the Kriging method, a qualitative and quantitative combination method is proposed for weighing the location factors of the civil aircraft spare parts support network. The location factors are sorted and classified, and the data requirements for quantitative analysis of the location are obtained. The aircraft material support network site selection is weighed, and then the importance of site selection factors is evaluated. The validity and applicability are verified by comparing the proposed method with analytic hierarchy process, response surface method and Monte Carlo method. The results show that the proposed method can effectively evaluate the importance of site selection factors and lay a foundation for the construction of civil aircraft aviation materials support network.

Key words: civil aircraft; spare parts support network; factors weighing; Kriging model; importance evaluation

收稿日期: 2021-05-26; 修回日期: 2021-07-09

通信作者: 魏严锋, wei_jie05@163.com

引用格式: 魏严锋, 乔琳君. 民用飞机航材支援网络选址因素权衡方法研究[J]. 航空工程进展, 2022, 13(2): 143-149.

WEI Yanfeng, QIAO Linjun. Research on the factors weighting method in the site selection of civil aircraft spare parts support network[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(2): 143-149. (in Chinese)

0 引言

随着我国研制和生产民用飞机的能力逐步提高,包括 MA60、ARJ21-700 及 C919 等客机在内的具有自主知识产权的民用飞机应运而生^[1-3]。民用飞机主制造商不仅是飞机单个产品的提供者,还是飞机产品所对应的客户支援的服务者。客户支援中的航材支援服务在保障民用飞机安全可靠运营方面极为重要,主制造商为客户提供的航材支援服务的及时性也在一定程度上影响了客户运营的经济性和安全性。民用飞机主制造商提供充分的航材支援服务需要基于健全的航材支援网络^[4-6]。因此,有必要合理权衡民用飞机航材支援网络的选址影响因素,为航材支援等客户支援服务打下坚实的基础。

对于航材支援网络中的仓库选址,波音公司开发了全球航空库存网(Global Airline Inventory Network,简称 GAIN)计划,空客公司建立了华欧航空支援中心。相较于国外民用飞机制造商成熟的航材服务,中国商用飞机有限责任公司和中航西飞民用飞机有限责任公司在航材支援方面的研究起步较晚,但也正在开发航材支援中心管理系统,以增强国产飞机进入国际市场的竞争力。在理论研究方面,已有众多研究人员展开了相关研究。例如,辛昱等^[7]提出一种基于层次分析法和模糊物元分析法的后方航材仓库选址方案的优度评价方法;王玉成等^[8]考虑了航材仓库选址影响因素,建立了单目标局势决策模型;王静静^[9]提出了基于层次分析法的综合决策模型,用于解决航空公司最优航材配送中心的选址问题;刘欢^[10]从供应链管理、海航航材业务及内外部环境等多角度入手,对海航航材公司选址决策提出了相关建议并进行了分析;R. K. Singh 等^[11]根据不同仓库位置选择标准,采用模糊层次分析法进行仓库的最佳位置选择,以提高供应链的有效性;T. Özcan 等^[12]针对物流仓库选址问题,比较了多种多准则决策方法在该选址问题中的应用结果。上述研究运用多种方法进行航材仓库的选址决策分析,解决了相关问题,但是由于所提方法大多聚焦于定性指标的专家决策,具有主观不确定性。

为了合理进行民用飞机航材支援网络的选址决策,有必要建立基于定量分析的民用飞机航材支援网络选址因素权衡方法。因此,在分类梳理民用飞机航材支援网络选址因素的基础上,本文

基于 Kriging 法,提出具有定量分析思想的民用飞机航材支援网络选址因素权衡方法,通过航材支援的实际活动对该方法进行适用性验证,并进行所提方法的有效性比对。

1 航材支援网络选址因素分析

航材支援作为客户服务航材保障中的必要组成部分,负责航材支援活动的航材支援仓库及其航材支援链组成了民用飞机航材支援网络。为了保证航材的快速支援,民用飞机航材支援网络的选址决策至关重要,合理的选址既需要实现航材在多地区的安全储存和运输,还需要满足运营商的多种航材需求。而这些影响因素相互冲突、相互制约。因此,民用飞机航材支援网络选址因素的梳理和分析是选址决策的必要前提。结合民用飞机多地区实际运营的特点,将民用飞机航材支援网络选址因素分为决定性因素和影响性因素,如表 1 所示。

表 1 民用飞机航材支援网络选址因素
Table 1 Civil aircraft spare parts support network location requirements

因素属性	因素名称
决定性因素	政府政策及相关法律法规
	通信基础
	治安环境
	自然环境
影响性因素	成本
	运输基础
	支援时间

1.1 决定性因素

民用飞机航材支援网络选址的决定性因素来源于客户运营的地理环境、政策法律和航材支援活动的性质要求,该类因素对选址决策具有“一票否决制”的性质,将其作为备选地址是否可用于权衡的依据。即当民用飞机航材支援网络备选地址不满足该类因素中的任一因素时,此备选地址不予考虑。民用飞机航材支援网络选址的决定性因素主要包括以下 4 类^[13-14]:(1) 政府政策及相关法律法规;(2) 通信基础;(3) 治安环境;(4) 自然环境。

1.2 影响性因素

在满足民用飞机航材支援网络选址的决定性

因素后,使得客户的体验最好、效益最高、响应最快以及辐射性最强是民用飞机航材支援网络选址最重要的目标。民用飞机航材支援网络选址影响因素分为成本、运输基础和支援时间。

(1) 成本

国产民用飞机作为国际航空业中较晚进入市场的“后来者”,要做到在行业中具有强大的竞争力,在飞机交付后,必须注重客户服务,且客户服务追求低成本、高质量的目标。在民用飞机航材支援网络选址中,成本包括建设成本/租用成本、人工成本、运输成本以及经营成本。

(2) 运输基础

航材的运输方式包括水路、公路、铁路、航空运输。民用飞机航材支援网络选址需要考虑上述四种运输方式路线的数量、里程及极限货运量。除此之外,从航材供应商到分销商或者航空公司主运营基地的运输必须经过不同运输方式的接驳。运输方式接驳的难易程度直接影响航材运输的成本与运输时间,故有必要考虑不同运输方式间的接驳难易情况。

(3) 支援时间

高质量的航材支援服务具备敏捷支持特性,其含义是当客户提出航材需求时,主制造商快速作出航材支援指令,安排航材的运送。航材运输的快慢关系着客户的需求是否能够得到快速响应,从而影响客户的运营能力。运输时间包括公路运输时间、铁路运输时间、水路运输时间、空运运输时间及更换运输方式的接驳时间。

基于影响性因素的分析,有必要梳理出民用飞机航材支援网络选址数据(如表 2 所示),为开展民用飞机航材支援网络选址奠定基础,对选址因素在航材支援网络的预设地进行切实地反映。

表 2 民用飞机航材支援网络选址数据
Table 2 Civil aircraft spare parts support network location data

数据类型	具体数据
成本	建设/租用成本
	工人平均月工资
	预设地水电费
	运输方式单位路程运输价格
运输基础	运输路线的数量
	运输方式的里程
	运输方式的极限货运量
支援时间	运输方式的单位运输时间
	运输方式的接驳时间

2 基于 Kriging 的航材支援网络选址因素权衡模型

2.1 分析流程

民用飞机航材支援网络预设地作为民用飞机主制造商储存航材和分发航材的主要场所,是航材支援快速响应和敏捷支持的关键环节,其选址的合理性是航材支援客户服务开展的必要前提。因此,在民用飞机航材支援网络预设地已符合所梳理的决定性因素的基础上,提出一种基于 Kriging 的民用飞机航材支援网络选址因素权衡方法,其分析流程如图 1 所示,该方法明确影响性因素在选址决策中的重要度,为民用飞机航材支援网络的搭建提供有效的指导。

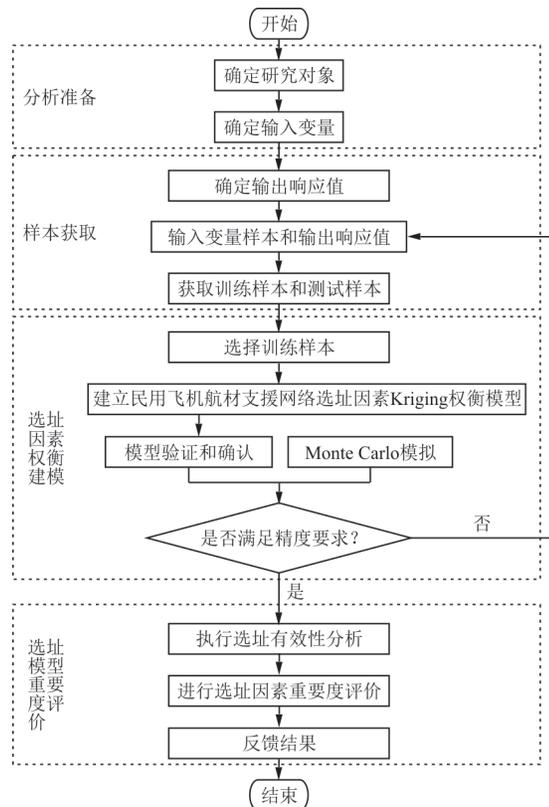


图 1 基于 Kriging 的民用飞机航材支援网络选址因素权衡分析流程

Fig. 1 Flow chart of weighing and analyzing the location factors of civil aircraft spare parts support network based on Kriging

2.2 模型建立

基于 Kriging 的民用飞机航材支援网络权衡模型建立的第一步是抽取选址样本,即假设所梳理的民用飞机航材支援网络选址输入参数满足高斯

分布,采用拉丁超立方抽样(Latin Hypercube Sampling,简称LHS)方法对选址输入参数进行抽样,LHS抽样原理决定了其产生的样本具有随机性和相对均匀性,可有效避免样本过度集聚。

选址输入参数所对应的输出响应为选址优劣度。假设选址输入参数对选址决策为积极影响,为正相关,反之为负相关,则输出响应为一次多项式。将上述样本集分为训练样本集和测试样本集,其中,训练样本集用于建立民用飞机航材支援网络选址因素的Kriging权衡模型,测试样本集则对所建立的模型进行有效性测试。

基于Kriging的民用飞机航材支援网络权衡模型可以近似表达为^[13-16]

$$\sigma_{g_k}^2(x) = \sigma^2 \left\{ 1 - r^T(x)R^{-1}r(x) + [F^T R^{-1}r(x) - f(x)]^T (F^T R^{-1}F)^{-1} [F^T R^{-1}r(x) - f(x)] \right\} \quad (3)$$

2.3 选址重要度评价

基于所建立的Kriging模型,民用飞机航材支援网络选址因素权衡目标对象的极限状态函数为

$$h_k(x) = g_{\text{allow}}(x) - g_k(x) \quad (4)$$

当 $h_k(x) \geq 0$ 时,所权衡的民用飞机航材支援网络选址问题处于有效域内,反之处于失效域内。已知模型输入参数的均值矩阵和方差矩阵分别为 $\boldsymbol{u} = [u_1, u_2, \dots, u_M]$ 和 $\boldsymbol{D} = [D_1, D_2, \dots, D_M]$,其中下标 M 为输入参数的个数。因此,可得基于Kriging模型的极限状态函数的均值与方差:

$$\begin{cases} E[h_k(x)] = u_{h_k(x)}(u_1, u_2, \dots, u_M; D_1, D_2, \dots, D_M) \\ D[h_k(x)] = D_{h_k(x)}(u_1, u_2, \dots, u_M; D_1, D_2, \dots, D_M) \end{cases} \quad (5)$$

运用Monte Carlo法对民用飞机航材支援网络选址因素的Kriging权衡模型进行重要度评价,选址失效概率 P_f 和选址有效概率 P_r 为

$$P_f = \int_F f(x) dx = \int_{R^N} I_F(x) f(x) dx = E[I_F(x)] = \frac{1}{N} \sum I_F(x) = \frac{N_f}{N} \quad (6)$$

$$P_r = 1 - P_f = \frac{N_r}{N} \quad (7)$$

式中: $f(x)$ 为随机变量的联合概率密度函数; F 为失效域; $E[\cdot]$ 为数学期望; N_f 为可靠样本数。

民用飞机航材支援网络选址重要度定义为选址失效概率 P_f 对输入随机变量 X_i 的第 k 个分布参数 $\theta_{X_i}^{(k)}$ ($i=1, 2, \dots, n; k=1, 2, \dots, m_i$,其中 m_i 为第 i 个输入变量 X_i 的分布参数的总数)的偏导数,即:

$$g_k(X) = \sum_{i=1}^p f_i(X) \beta_i + z(X) \quad (1)$$

式中: $g_k(X)$ 为未知的民用飞机航材支援网络选址因素权衡模型; $f_i(X)$ 为随机输入样本的基函数,提供全局近似模型; $f_i(X) = [f_i(X), f_2(X), \dots, f_p(X)]^T$; β 为回归函数的待定系数, $\beta = [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p]^T$; p 为基函数的个数; $z(X)$ 为一随机过程,是在全局模拟的基础上创建的期望为0且方差为 σ^2 的局部偏差。

对于任一输入样本 x , $g_k(x)$ 服从一个高斯分布,即 $g_k(x) \sim N[u_{g_k}(x), \sigma_{g_k}^2(x)]$,其中均值与方差可表示为

$$u_{g_k}(x) = f^T(x) \hat{\beta} + r^T(x) R^{-1}(g - F\hat{\beta}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial P_f}{\partial \theta_{X_i}^{(k)}} = \frac{\partial \int_F f(x) dx}{\partial \theta_{X_i}^{(k)}} = \int_F \frac{\partial f(x)}{\partial \theta_{X_i}^{(k)}} dx \quad (8)$$

采用Monte Carlo法对式(7)所示的选址重要

度进行求解,可得其估计值 $\frac{\partial P_f}{\partial \theta_{X_i}^{(k)}}$ 为

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_f}{\partial \theta_{X_i}^{(k)}} &= \int_F \frac{\partial f(x)}{\partial \theta_{X_i}^{(k)}} \frac{1}{f(x)} f(x) dx = \\ &= \int_{R^N} I_F(x) \frac{\partial f(x)}{\partial \theta_{X_i}^{(k)}} \frac{1}{f(x)} f(x) dx = \\ &= E \left[\frac{I_F(x) \frac{\partial f(x)}{\partial \theta_{X_i}^{(k)}}}{f(x)} \right] = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left[\frac{I_F(x_j) \frac{\partial f(x_j)}{\partial \theta_{X_i}^{(k)}}}{f(x_j)} \right] \end{aligned} \quad (9)$$

式中: $I_F(x)$ 为选址失效域指示函数; N 为样本个数。

3 航材支援网络选址因素权衡

3.1 选址因素权衡分析

根据民用飞机航材支援网络选址影响性因素,考虑其数据在实际航材支援业务中具有随机性,令建设/租用成本 C_1 、工人平均月工资 C_2 、预设地水电费 C_3 、运输方式单位路程运输价格 C_4 、运输路线的数量 N_1 、运输方式的里程 N_2 、运输方式的极限货运量 N_3 、运输方式的单位运输时间 T_1 和运输方式的接驳时间 T_2 作为随机输入变量,假设相关变量服从正态分布且相互独立,其数值特征如表3所示。

表 3 选址随机输入变量数值特征
Table 3 Numerical features of random input variables for location

输入变量	均值	标准差	输入变量	均值	标准差
C_1 /元	8 132	768	N_2 /km	650	97.5
C_2 /元	3 000	450	N_3 /t	22	2
C_3 /元	10 000	1 500	T_1 /h	75	11.25
C_4 /元	1 178	107.16	T_2 /h	11.25	0.75
N_1 /条	5	0.75			

$$y(C_1, \dots, C_4, N_1, \dots, N_3, T_1, T_2) = -2.974 1e^{-13} \times C_1 - 1.621 3e^{-14} \times C_2 + \dots - 1.002 1 \times T_2 - 1.002 1 \times C_1^2 - 0.062 1 \times C_1 C_2 + \dots - 3.251 8e^{-14} \times C_1 T_2 + 2.005 1e^{-14} \times C_2^2 + 6.204 9e^{-15} \times C_2 C_3 + \dots + 1.017 5e^{-13} \times C_2 T_2 + 1.013 5e^{-13} \times C_3^2 + 1.000 3e^{-13} \times C_3 C_4 + \dots + 2.468 9e^{-14} \times C_3 T_2 - 1.040 1e^{-13} \times C_4^2 - 6.917 2e^{-14} e^{-13} \times C_4 N_1 + \dots + 4.011 4e^{-14} \times C_4 T_2 + 3.913 4e^{-14} \times N_1^2 - 4.936 5e^{-14} \times N_1 N_2 + \dots - 1.551 2e^{-14} \times N_1 T_2 - 1.239 5e^{-13} \times N_2^2 + 3.483 2e^{-14} \times N_2 N_3 + \dots - 8.132 0e^{-15} \times N_2 T_2 + 8.816 9e^{-14} \times N_3^2 - 6.357 9e^{-14} \times N_3 T_1 - 1.737 9e^{-14} \times N_3 T_2 - 1.032 1e^{-14} \times T_1^2 - 1.158 7e^{-14} \times T_1 T_2 + 1.018 6e^{-14} \times T_2^2 \quad (10)$$

在所建立的民用飞机航材支援网络选址因素的 Kriging 权衡基础上,构建极限状态函数,并结合 Monte Carlo 法对极限状态函数进行 10 000 次抽样模拟计算,可得抽样历史和频率直方图,如图 2~图 3 所示。

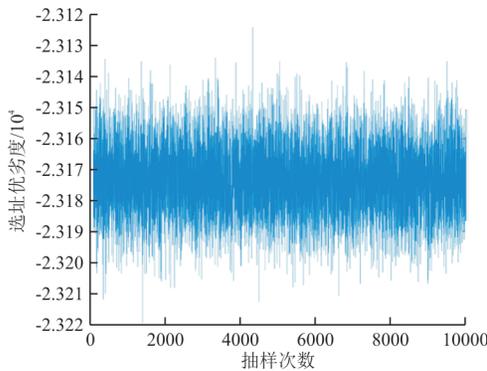


图 2 抽样历史

Fig. 2 Sampling history

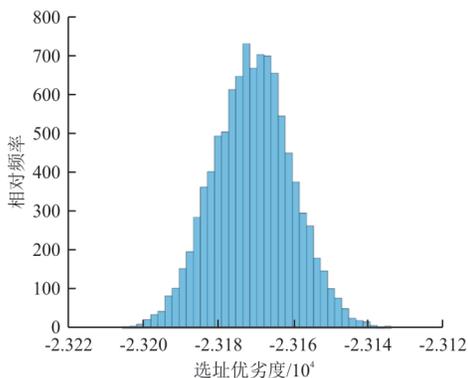


图 3 分布直方图

Fig. 3 Distribution histogram

基于民用飞机航材支援网络选址的随机输入样本数值特征,采用 LHS 法进行抽样并获取 100 组输入样本数据。将样本数据进行基于层次分析法的选址优劣性评价,从而构成 100 组样本数据。从中取前 70 组数据作为选址因素权衡模型的训练样本,后 30 组数据作为模型验证样本。根据民用飞机航材支援网络选址因素权衡原理,可建立选址因素的 Kriging 权衡模型,如式(10)所示。

其各项影响性因素的重要度如表 4 所示,可以看出:在民用飞机航材支援网络选址因素权衡中,运输方式的单位运输时间在民用飞机航材支援网络选址因素权衡中的影响程度最大,预设地水电费重要度最小。

表 4 选址各影响性因素重要度
Table 4 Importance value of random input variables for location

影响性因素名称	重要度
建设/租用成本 C_1	$-4.240 7 \times 10^{-7}$
工人平均月工资 C_2	$-1.276 8 \times 10^{-6}$
预设地水电费 C_3	$3.925 2 \times 10^{-7}$
运输方式单位路程运输价格 C_4	$-1.495 9 \times 10^{-6}$
运输路线的数量 N_1	$2.179 5 \times 10^{-4}$
运输方式的里程 N_2	$3.789 4 \times 10^{-6}$
运输方式的极限货运量 N_3	$2.059 7 \times 10^{-4}$
运输方式的单位运输时间 T_1	$-4.823 8 \times 10^{-4}$
运输方式的接驳时间 T_2	$-3.147 1 \times 10^{-4}$

应注意,选址优劣度值有正负之分,正负分别表示影响因素的优劣程度正相关和负相关,如图 4 所示。即正号表示优劣程度随着影响因素值的增大而变好,减小而变坏;负号表示优劣程度随着影响因素值的增大而变坏,减小而变好。

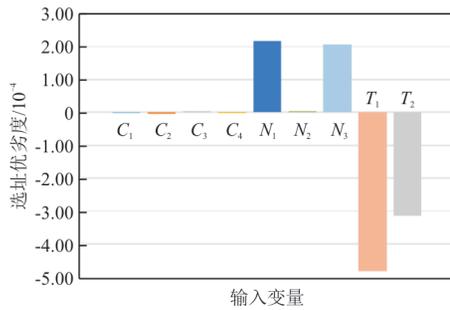


图4 选址影响因素的相对重要度

Fig. 4 Relative importance of random input variables for location

3.2 方法验证

为验证所提出的民用飞机航材支援网络选址权衡方法的建模特性,结合模型训练样本,从两个方面进行方法验证:一是以层次分析法^[17]为参考从趋势的角度进行对比验证,二是与响应面法(Response Surface Method,简称RSM)、Monte Carlo数字模拟法进行比较,验证预测精度与建模时间。

在趋势验证中,基于层次分析法的建设/租用成本、工人平均月工资、预设地水电费、运输方式单位路程运输价格、运输路线的数量、运输路的里程、运输方式的极限货运量、运输方式的单位运输时间和运输方式的接驳时间的相对重要度为

$$S = [0.0859, 0.0969, 0.0826, 0.1034, 0.1278, 0.1134, 0.1236, 0.1344, 0.1317]$$

可以看出:民用飞机航材支援网络选址因素重要程度依次为运输方式的单位运输时间、运输方式的接驳时间、运输路线的数量、运输方式的极限货运量、运输方式的里程、运输方式单位路程运输价格、工人平均月工资、建设/租用成本和预设地水电费。因此,本文所提方法与层次分析法的结果趋势一致。

对于预测精度与建模时间,对比分析结果如表5所示。

表5 民用飞机航材支援网络选址权衡模型特性分析
Table 5 Analysis of characteristics of weighting model for location of civil aircraft spare parts support network

方法	建模时间/s	平均绝对误差/(10 ⁻⁵ m)	提高精度/%
Monte Carlo	0.5546	5.3278	—
本文方法	0.3864	4.8969	8.08
RSM	0.4309	5.0283	5.62

从表5可以看出:相较于RSM和Monte Carlo数字模拟法,本文所提方法建模时间最短,预测精度最高。表明本文所提出的方法具有一定的优势。

综上所述,本文所提出的方法可以在保证趋势分析一致的前提下,提高分析精度和建模效率。

4 结论

(1) 本文提出了一种用于民用飞机航材支援网络选址因素的Kriging权衡方法,在考虑决定性因素的定性决策基础上,为选址影响因素的重要度评价提供了可靠客观的解决思路。

(2) 相比于层次分析法、响应面法、Monte Carlo数字模拟法,本文所提的权衡方法可在保证权衡分析结果趋势一致的前提下,有效提高建模效率和预测精度。

参考文献

- [1] 孟锐征,贾佳. C919大型客机国内市场销售策略初探[J]. 民用飞机设计与研究, 2012(1): 44-46.
MENG Ruizheng, JIA Jia. Primary research for C919 selling to the domestic marketing[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2012(1): 44-46. (in Chinese)
- [2] 肖静. ARJ21: 中国民航适航审定的挑战——访民航总局适航审定司赵越让副司长[J]. 中国民用航空, 2007(5): 18-20.
XIAO Jing. ARJ21: challenges of airworthiness accreditation of CAAC—interview with ZHAO Yuerang, deputy director general of Airworthiness Accreditation Department of CAAC[J]. China Civil Aviation, 2007(5): 18-20. (in Chinese)
- [3] 王东. MA60高原机场和航线的运行适航性分析[D]. 广州: 中国民用航空飞行学院, 2011.
WANG Dong. Operation airworthiness analysis of MA60 highland airport and air route[D]. Guanghan: Civil Aviation Flight University of China, 2011. (in Chinese)
- [4] 吴清亮,董辉,张政,等. 基于神经网络对航材备件需求率的预测分析[J]. 兵工自动化, 2009, 28(1): 54-55.
WU Qingliang, DONG Hui, ZHANG Zheng, et al. Predictive analysis of requirement rate of aviation material spares based on neural network[J]. Ordnance Industry Automation, 2009, 28(1): 54-55. (in Chinese)
- [5] 赵淑舫,宁宣熙,吴桐水. 航材需求预测模型研究[J]. 中国民航学院学报, 2002, 20(3): 20-23.
ZHAO Shufang, NING Xuanxi, WU Tongshui. Aircraft spare part demand forecast model[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2002, 20(3): 20-23. (in Chinese)

- [6] 喻拿仑. 基于某货运航空公司的航材管理研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
YU Nalun. Research on air material management based on a cargo airlines company [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017. (in Chinese)
- [7] 辛昱, 郑金忠, 张梁, 等. 基于AHP-FMEA的航材仓库选址合理性评价研究[J]. 兵工自动化, 2016, 35(6): 80-83, 93.
XIN Yu, ZHENG Jinzhong, ZHANG Liang, et al. Rationality evaluation of air materiel warehouse location selection based on AHP-FMEA[J]. Ordnance Industry Automation, 2016, 35(6): 80-83, 93. (in Chinese)
- [8] 万玉成, 孙倩, 曹阳. 基于单目标化局势决策的航材仓库选址研究[C]// 第十二届中国青年信息与管理学者大会. 北京: 中国运筹学会不确定系统分会, 2010: 108-114.
WAN Yucheng, SUN Qian, CAO Yang. Location selection of aviation material warehouse based on single objective situation decision[C]// The 12th China Youth Information and Management Scholars Conference. Beijing: Uncertainty Systems Branch, Chinese Society for Operations Research, 2010: 108-114. (in Chinese)
- [9] 王静静. 航材配送中心选址模型的研究与应用[J]. 民航管理, 2016(5): 77-80.
WANG Jingjing. Research and application of location model of aviation material distribution center [J]. Civil Aviation Management, 2016(5): 77-80. (in Chinese)
- [10] 刘欢. 海航H航材公司发展战略研究[D]. 海口: 海南大学, 2017.
LIU Huan. Research on the development strategy of HNA H aviation material company [D]. Haikou: Hainan University, 2017. (in Chinese)
- [11] SINGH R K, CHAUDHARY N, SAXENA N. Selection of warehouse location for a global supply chain: a case study [J]. IIMB Management Review, 2018, 29: 343-356.
- [12] ÖZCAN T, ÇELEBI N, ESNAF Ş. Comparative analysis of multi-criteria decision making methodologies and implementation of a warehouse location selection problem [J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38: 9773-9779.
- [13] 白会芳, 董雅丽. 现代物流管理教程[M]. 北京: 经济管理出版社, 2016.
BAI Huifang, DONG Yali. Modern logistics management course[M]. Beijing: Economic Management Press, 2016. (in Chinese)
- [14] 张泽浩. 基于关税成本和运价折扣的K公司海外仓选址研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
ZHANG Zehao. Research on the location of K company's overseas warehouse based on tariff cost and freight price discount [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019. (in Chinese)
- [15] KLEIJNEN J P C. Regression and Kriging metamodelling with their experimental designs in simulation: a review [J]. European Journal of Operational Research, 2017, 256(1): 1-16.
- [16] BERBARDINI E, SPENCE S M J, WEI D, et al. Aerodynamic shape optimization of civil structures: a CFD-enabled Kriging-based approach [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2015, 144: 154-164.
- [17] 陈俊宇, 冯蕴雯, 郭英男, 等. 民用飞机LRU划分的双步迭代层次分析法[J]. 航空工程进展, 2020, 11(4): 479-486.
CHEN Junyu, FENG Yunwen, GUO Yingnan, et al. LRU division of civil aircraft based on two-step iterative analytic hierarchy process[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2020, 11(4): 479-486. (in Chinese)

作者简介:

魏严锋(1977—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:飞机运行支持技术。

乔琳君(1978—),女,硕士,副教授。主要研究方向:电气工程与自动化,人工智能。

(编辑:马文静)