

文章编号:1674-8190(2020)04-443-11

民用飞机航材预测与配置管理技术综述

冯蕴雯,陈俊宇,刘佳奇,路成,薛小锋

(西北工业大学 航空学院,西安 710072)

摘要: 航材作为综合后勤保障(ILS)的物资基础,其科学的预测与合理的配置是有效保障民用飞机安全经济运行的前提。为了使利益攸关方(制造商、运营商、维修商等)实现共赢,本文针对现有民用飞机航材预测与配置管理技术进行研究,并探讨其发展趋势。首先,介绍了民用飞机航材预测技术的研究现状;然后,论述了民用飞机航材配置管理技术的研究现状;最后,在总结现有关于航材预测与配置理论和方法的优势与不足的基础上,对民用飞机航材预测与配置管理技术的发展进行了趋势分析,为国产民用飞机航材综合管理提供参考,进而提升民用飞机维修保障体系的完善程度。

关键词: 民用飞机;航材;预测与配置;维修保障

中图分类号: V267

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2020.04.001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Review on the Civil Aircraft Spare Parts Prediction and Configuration Management Technology

FENG Yunwen, CHEN Junyu, LIU Jiaqi, LU Cheng, XUE Xiaofeng

(School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: As the material base of integrated logistic support (ILS), scientific prediction and reasonable configuration of spare parts can effectively ensure the safe and economic operation of civil aircraft. To achieve all-win results for stakeholders (manufacturers, operators, repairers, etc.), this paper conducts an investigation on the prediction and configuration management technologies for civil aircraft spare parts, and discusses its development trend in future. Firstly, the research status for the prediction technologies of civil aircraft spare parts is introduced. Secondly, the research status for the configuration management methods is explored of civil aircraft spare parts. Finally, the development trend of civil aircraft spare parts prediction and configuration management technology is studied based on the advantages and disadvantages of the existing methods. The aim of this paper is to provide a reference for the comprehensive management of domestic civil aircraft spare parts, and to improve the maintenance support system of civil aircraft.

Key words: civil aircraft; spare parts; prediction and configuration; maintenance support

收稿日期:2020-06-20; 修回日期:2020-07-12

基金项目:国家自然科学基金(51875465)

通信作者:冯蕴雯, fengyunwen@nwpu.edu.cn

引用格式:冯蕴雯,陈俊宇,刘佳奇,等. 民用飞机航材预测与配置管理技术综述[J]. 航空工程进展, 2020, 11(4): 443-453.

FENG Yunwen, CHEN Junyu, LIU Jiaqi, et al. Review on the civil aircraft spare parts prediction and configuration management technology[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2020, 11(4): 443-453. (in Chinese)

0 引言

航材作为综合后勤保障(Integrated Logistic Support, 简称 ILS)的关键物资资源,其预测的科学性和配置的合理性直接关系到制造商、运营商、维修商等攸关方的利益,同时也关乎民用飞机安全经济地运营。目前全球民航业储存了 500 亿美元的航材,约占航空公司 75% 的库存资金和 25% 的流动资金,但实际上大部分航材的利用率和周转率极低,只有 25% 的航材被使用,航材管理存在紧急缺货或过度积压等问题,进而造成飞机停场(Aircraft on Ground, 简称 AOG)或资源浪费现象^[1]。如何有效解决现存的问题,取得利益攸关方共赢的局面,是目前民用飞机航材综合管理研究的重点和热点。

20 世纪 60 年代,国内外航空业就已经认识到因缺乏航材或航材囤积而造成的经济损失和运营能力降低的问题,深知开展航材综合管理研究的重要意义,多年来展开了大量的研究并进行实际运用。国内外对于民用飞机航材综合管理研究主要包括两个方面:一是航材预测管理,其目的是结合航材消耗规律、历史数据、相关影响参数等预测未来某一段时间的航材需求预测值,避免航材采购量与实际需求产生偏差;二是航材配置管理,其目的是依据机队当前的运营规模和需求,结合航材支援网络站点的分布特征,将采购的航材进行合理分配,以期能够在保障机队可用度的前提下,合理实现航材库存管理,降低运营支持成本。众多航空公司和主制造商基于航材需求预测与配置管理技术的研究进行了工程运用,为客户提供周到快捷的航材支援服务。例如,波音公司启动了全球飞机库存网计划(Global Airline Inventory Network, 简称 GAIN)^[2],空客公司建立了经 ISO9000 认证的华欧航空支援中心^[3],西安飞机制造公司建立了基于 SPEC2000 的中央备件库和卫星库。

为了完善和发展国产民用飞机维修保障体系,本文针对航材预测与配置管理技术进行研究,总结现有理论和方法在航材综合管理方面的优势与不足,并对其发展趋势进行分析,以期为我国民用航空行业自身竞争力的提升提供支持。

1 民用飞机航材预测技术研究现状

民用飞机航材预测作为航材支援体系工作的重点内容之一,其相关技术的有效性是实现航材精准预测的基础,同时也是合理指导航材计划采购和供应的重要参考^[4]。航材预测的意义在于不仅可以提高民用飞机保障工作的预见性、决策科学性和针对性,而且可以保障民用飞机运营过程中的安全性和签派可靠性。随着民用航空业的稳步发展,关于民用飞机航材预测的技术也得到快速发展,目前主要可概括为三个方面(如图 1 所示):基于时间序列法的航材预测技术、基于回归分析法的航材预测技术和基于机器学习的航材预测技术。此外,每类航材预测技术还包含多种方法。

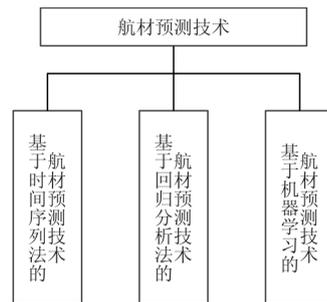


图 1 航材预测技术研究框架

Fig. 1 Research framework of spare parts prediction technology

1.1 基于时间序列法的航材预测技术

时间序列是指依据时间数列对其进行发展趋势预测的方法,并且具有趋势性、季节性、周期性、不规则性等特征^[5-7]。对于航材预测的时间序列法,本文将针对移动平均法、指数平滑法、灰色预测法等研究现状进行论述。

基于移动平均法的航材预测是在考虑航材消耗的趋势性和周期性的情况下,对数据进行一定程度的修正来消除不规则扰动对航材预测精度的影响。左山等^[8]利用移动平均预测法建立航材消耗的预测模型,并探讨移动平均项数对预测误差的影响;董健康等^[9]运用中心移动平均法建立了航材备件定量订货模型,用以提高航材采购数量的精确性;F. R. Johnston 等^[10]采用指数加权移动平均法对航材消耗量进行了预测,并通过均方差对分析误

差进行了比较,验证了方法的可行性;T. R. Willemain等^[11]在分析航材寿命特征分布的前提下,将移动平均法用于航材消耗预测分析;张大鹏等^[12]将移动平均法应用于消耗性航材需求的预测,并通过案例对方法的适用性进行了验证。

基于指数平滑法的航材预测是基于移动平均法发展而来的,结合前期的数据和预测值,经过加权后获取目标的预测值,用以消除航材需求预测过程中的不规则和随机扰动情况^[13]。郭峰等^[14]采用指数平滑法进行航材消耗定额预测,通过对比分析说明不同指数平滑法对于航材预测精度的影响。指数平滑方法、指数加权移动平均法等适用于连续需求的预测方法,一度被用来进行需求预测,但其结果精度不高,尤其在需求中有大量的零的情况下,因此J. D. Croston综合考虑需求时间间隔与消耗历史的影响,在指数平滑方法基础上提出了Croston方法用以实现航材预测^[15];但实际中,很多需求都不符合正态分布,因此预测精度不是很高。后来A. A. Syntetos等对此作了改进,针对实际需求预测中并非所有需求都满足正态分布的情况,通过对Croston方法的修正给出了需求间隔的近似无偏需求^[16-17];刘晓春等^[13]基于指数平滑方法针对装备维修过程中所需备件进行了预测研究;杨杰等^[18]对需求与装置检修相关的备件进行了研究,将指数平滑用于备件预测,并从分析精度的角度进行了验证。

航材消耗数据呈现波动情况,无法得到有效统计和计算,航材预测可用灰色系统理论进行实现。并且,航材消耗是由飞机飞行任务、状态情况、保障情况等多个因素共同影响,众多因素潜在而复杂的影响使得航材消耗具有明显的灰色性。郭峰等^[19]、支乐等^[20]结合历年航材消耗数据,利用灰色系统理论中的GM(1,1)模型对航材需求进行了预测分析;刘杨等^[21]针对装备贮存过程中备件需求呈现间断性的情况,结合灰色理论建立了需求备件预测模型;张扬等^[22]在GM(1,1)预测模型中引入修正因子修正灰色预测结果,提高航材预测精度,通过实例验证了模型的有效性;杨冰冰^[23]在研究GM(1,1)模型的基础上,提出了多维GM(1, N)灰色预测模型,对飞机大修航材消耗量进行了分析;万玉成^[24]将GM(1,1)模型和未确知聚类模型应用于航材预测,并结合案例说明了其方法在航

材需求量确定方面的有效性。

此外,刘信斌等^[25]充分考虑了季节性对航材需求的影响,综合分析了航材需求的各种因素,利用航材实际需求数据,通过逐期差分和季节性差分转化为平稳的时间序列,采用自回归移动平均移动模型—乘积季节模型对未来航材需求做短期预测;毕钊等^[26]考虑了时间序列影响因素之间的相互作用,提出了基于R语言SARIMA的航材预测模型,对后期航材需求进行了分析;A. A. Ghobbar等^[27-29]探究了温特斯方法、季节回归方法等在航材预测方面的应用,并通过英国最大的航空公司之一的组件检修车间为研究对象进行了验证;R. H. Teunter等^[30-31]使用英国皇家空军的大型数据集,将Bootstrap法用以预测间断型航材的需求。

虽然上述研究工作可为航材预测提供支持,但是当航材历史消耗数据波动较大时,基于时间序列法的航材预测值与工程实际需求之间存在较大偏差,进而导致不能有效指导航材采购及后期供应。

1.2 基于回归分析法的航材预测技术

航材预测值实质上会受到单因素或多因素的影响,一般通过回归分析法建立目标输出与输入变量之间的关系,确定航材消耗与影响变量的关系方程,将其作为航材需求预测模型,依据输入变量的变化实现航材需求预测。

近年来,许多研究人员对基于回归分析法的航材预测技术进行了研究。汪娅等^[32]考虑航材消耗因素的影响,运用线性回归方法开展了消耗性航材的需求预测研究;陈振林等^[33]提出了一种非参数回归的航材消耗预测模型,探究了该方法在航材预测方面的应用;杨仕美等^[34]提出了一种基于最小二乘支持向量机和信息熵组合的航材需求预测方法;Guo F等^[35]提出了一种回归分析组合方法,基于周转数据实现飞机航材的需求预测。

关于回归分析法在航材预测方面的应用主要存在的问题为:当涉及影响因素过多时,回归分析法预测分析的精度会降低,不能有效实现航材需求预测。此外,当变量参数维度较高时,需要足够的样本支撑来实现回归分析模型的建立。

1.3 基于机器学习的航材预测技术

支持向量机和神经网络模型是机器学习

模型的典型方法,这两种方法不仅适用于研究航材预测值与影响参数之间的关系,同时也适用于通过历史消耗数据来实现航材预测的情况。

目前,基于支持向量机和神经网络模型的航材预测已取得了大量的研究成果。牛余宝等^[36]考虑飞行时间、起降次数等因素,建立了支持向量机回归模型,对飞机的航材消耗预测进行了研究;Z. S. Hua 等^[37]基于逻辑回归方法与支持向量机提出了一种用于实现间断性航材需求预测方法;薛彦轶等^[38]考虑保障任务、航材性能、环境及人事等影响因素,建立了航材预测模型,用以实现系统航材的需求分析;孙伟奇等^[39]将最小二乘支持向量机应用于新机备件需求的预测;韩玉等^[40]结合粗糙集的理论知识分析航材消耗的影响因素并去除冗余,利用神经网络找出消耗数量和影响因素之间的非线性关系,建立航材消耗的预测模型;钟颖等^[41]针对备件需求预测的非线性及时间序列的特点,采用 BP 神经网络对备件实现了较高的精度预测;A. S. Vander 等^[42]结合备件消耗信息,探究人工神经网络模型在备件需求预测中的应用;孙

蕾^[43]运用人工神经网络对民用飞机航材进行了预测,并验证该方法在工程领域的适用性;E. Levner 等^[44]基于神经网络模型对具有缺货订单和区间需求的民用飞机多级备件库存进行了分析;J. E. Boylan 等^[45]将近年来备件需求预测方法和技术进行了总结,其中大多数方法集中在支持向量机和人工神经网络方面;李连等^[46]采用附加动量项和变步长思想对 BP 神经网络进行改进,提出了改进 BP 神经网络算法,并将其用于航材需求量的预测。

尽管机器学习理论相对于传统方法在航材预测方面表现出了相对优势,但是其相关理论发展目前仍在探究阶段,在工程实际应用方面的可行性还需进一步验证。此外,机器学习的航材预测技术是建立在大量有效数据的基础上,因此仍需结合工程实际数据进一步探讨其可行性。

以上三类航材预测方法各有特点,在航材需求预测的工程应用中,应当根据航材本身的特征和预测问题的实际情况,分析并选择合理的方法。民用飞机航材预测技术三类方法的对比分析如表 1 所示。

表 1 民用飞机航材预测技术研究现有方法比较

Table 1 Comparison of existing methods for civil aircraft spare parts prediction management

方法	数据源	理论基础	优点	不足	应用
时间序列法	历史航材消耗数据	移动平均法	可进行短中长期预测	当数据具有波动性时,预测精准度低	航材消耗量波动不大
		指数平滑法			
		灰色系统理论			
		季节性差分自回归滑动平均模型			
回归分析法	航材成本、机队规模、运营小时、保障率、拆换量等	非线性回归	准确表达预测因素与预测值的关系	因素过多时预测精准度下降,变量多维时样本需求量大	预测量受多因素影响的航材
		线性回归			
机器学习	航材成本、机队规模、运营小时、保障率、拆换量等	支持向量机 人工神经网络	具有自学习能力,可高速寻找预测最优解	工程可行性需验证理论和算法需要完善优化	非线性系统

2 民用飞机航材配置管理技术研究现状

航材配置管理是航材支援体系另一工作重点,其目的是实现航材的合理分配,使航材库存保持在一个安全有效的水平,避免库存紧缺或资源浪费的现象,保障飞机在运营过程中发生故障时能够及时

获取所需航材,提高维修效率和日利用率、保障签派可靠性、降低运营支持成本等。目前,国内外已对民用飞机航材配置管理技术进行了大量的研究,主要包括基于解析方法的航材库存配置管理技术和基于优化算法的航材配置管理技术,如图 2 所示。

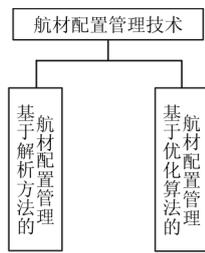


图 2 航材配置管理技术研究框架
Fig. 2 Research framework of spare parts configuration management technology

2.1 基于解析方法的航材配置管理

民用飞机航材库存管理源于美国兰德公司为美国空军研制的多级库存管理 (Multi-Echelon Technique for Recoverable Item Control, 简称 METRIC) 理论^[47], 该理论实际上是建立在两个基本假设基础上的两级 (基地级和基层级) 维修保障系统评估与优化模型, 其假设条件为: 两级修理车间具有无限修理能力 (修理设备数量是无限的), 故障件到达后无需等待立即进入修理状态; 故障件失效率与工作件的数量无关。METRIC 理论被广泛应用于复杂装备的备件配置管理, 例如欧洲的海军及空军广泛应用 OPUS 商业软件来进行航材配置管理, 而该软件普遍采用 METRIC 模型。

当前工程领域所采用的航材库存管理方法都是基于 METRIC 理论发展而来, 且受到学术界的广泛关注, 并开展了大量研究。C. C. Sherbrooke 等^[48] 在静态 Palm 定理的基础上, 对所有库存数量可能的排列组合计算分析相应的期望缺货值, 寻找在总费用约束下使备件使用效能最大的 METRIC 模型; 郑超^[49] 结合 METRIC 模型, 引入虚拟库存管理理论, 建立了以保障备件供应率为约束、以备件库存网络总体成本最小为目标的改进 METRIC 模型; M. Z. Ruan 等^[50] 基于 METRIC 理论和系统分析方法, 通过引入拉格朗日因子, 建立了基于多约束的备件动态配置模型, 用以解决受备件成本、备件数量、质量及规模所影响的备件配置问题。随后, 在深入研究 METRIC 理论的基础上, 演化出了 DYNA-METRIC 模型、VARI-METRIC 模型以及 MOD-METRIC 模型^[51-53], 且这些方法均得以应用, 其发展历程如图 3 所示。

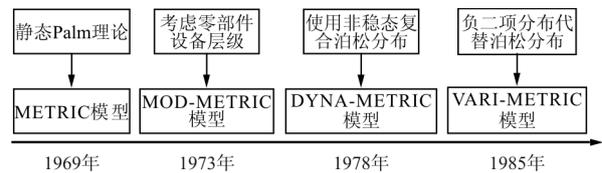


图 3 METRIC 模型发展历程
Fig. 3 Development of METRIC model

J. F. Burns 等^[54] 提出了 DYNA-METRIC 模型, 该模型考虑多级库存且以系统可用度为目标, 在动态战时环境下后勤支持过程影响飞行部件的性能, 它使用非稳态的复合泊松分布过程来得到实际的初始航材供应环境的动态特征, 所要求的限制条件很少, 在一定程度上解决了许多工程实际问题, 从而树立了 METRIC 模型族在航材预测领域里的地位; J. A. Muckstadt^[55] 结合 MOD-METRIC 模型探讨了备件配置数量, 可在总成本约束下最小化整体系统的缺货数量来得到各维修层级备件数量, 并在 F-15 武器系统上得以应用; T. Graves 等^[56] 针对 METRIC 模型中期望缺货值的误差进行分析, 采用负二项分布代替泊松分布, 将 VARI-METRIC 模型应用于备件配置管理; 孙蕾等^[57] 基于 VARI-METRIC 理论, 建立了以平均等待备件时间为目标, 以费用为约束的多层次库存模型, 应用边际分析法进行寻优, 解决了航材多级库存优化配置问题。

此外, 国内一些科研机构也从不同角度开展了基于解析方法的航材配置管理研究, 如北京航空航天大学康锐教授课题组通过对备件特征参数和备件满足率的研究, 建立了以保障率为约束的备件配置模型, 分析了影响备件需求的主要因素、装备维修需求和备件需求之间的关系, 并且给出了备件配置的计算方法^[58-59]。南京航空航天大学左洪福教授课题组对 METRIC 模型进行了研究, 以最小化系统的总成本为目标, 保障率为约束, 建立多级库存配置模型, 并通过与仿真试验结果进行比较, 验证了该模型的有效性^[60]。西北工业大学冯蕴雯教授课题组对民用飞机航材配置管理进行了系统地研究, 首先对备件库存优化进行了研究, 分别基于修理级别和冗余系统对备件库存配置的影响, 考虑部件的故障过程、维修周转以及订购补给情况提出了修理级别与备件库存进行联合优化的非线性模型^[61-62] 和基于马尔科夫的冗余系统备件与冗余度

的联合优化模型^[63], 并采用 PSO 算法进行求解, 以到达节省维修费用的作用^[64]; 然后针对现有的备件库存优化模型无法准确描述民用飞机可修件由于不能修复如新导致其性能逐次劣化及一定维修次数后报废的实际情况, 结合准更新理论、排队论和 VARI-METRIC 模型提出了考虑不完全维修的民用飞机可修件多级库存规划方法^[65]; 在实际工程中会产生某一航站发生备件短缺直接从相邻航站进行备件补给的横向供应情况, 并且横向供应模式会比传统保障模式节约更多的时间与成本, 因此, 将工程实际因素中的维修比例、横向供应和重要度分别引入 METRIC 模型, 构建了以可用度或保障率为约束、以航材成本或维修成本为优化目标的航材单级和多级配置模型, 结合边际分析法、改进边际分析法等实现模型求解, 实现航材配置管理, 将所提算法通过 B737NG、B787、A330 等运营数据进行了验证, 为 ARJ21 飞机航材库存管理提供参照^[66-68]; 最后, 在此基础上特别对民用飞机 LRU 的备件库存配置进行了详尽的研究^[69]。海军工程大学李庆民教授课题组放宽了 METRIC 模型中无限维修总体的假设条件, 对故障件的平均维修周转时间及备件供应渠道进行了修正, 分析了在多级修理模式下串件拼修的特点, 建立了非串件系统、串件系统以及不完全串件系统的可用度评估模型^[70-71]。

上述工作为民用飞机航材配置管理提供了理论支撑, 可为工程实际应用提供参考。然而, 当航材配置过程中涉及大量研究项目时, 解析方法在求解过程中相对繁琐, 进而导致计算时间很长甚至无法完成问题的求解。

2.2 基于优化算法的航材配置管理

随着计算机技术的快速发展, 大量优化算法也随之涌现, 且在各个领域得以应用。对于民用飞机

航材配置管理, 该类方法也同样适用。

针对航材配置管理的优化算法, 国内外已开展了大量研究, 并取得了阶段性成果。P. Batchoun 等^[72]为了最小化意外故障造成的延误成本, 使用遗传算法确定种群规模、迭代次数等参数并进行测试, 以优化备件配置, 并通过算例数值结果说明了该方法的有效性; 李圆芳^[73]建立了考虑总体保障率和航材总体占用资金较少的航材配置优化模型, 并采用遗传算法对模型进行求解; P. P. Luis 等^[74]将粒子群优化算法与局部搜索相结合, 以解决航材备件的多级库存配置优化问题; 田静等^[75]以系统保障率为目标函数, 引入成本变量, 利用对收缩扩张系数和进化因子改进后的量子粒子群算法, 用以求解单位成本系统保障率最大的航材配置模型; 张斯嘉等^[76]建立了存储保障费用与战备完好性相结合的多目标决策模型, 结合基于蝙蝠算法进行优化计算得到的存储方案可以在战备完好性尽可能高的前提下保证费用最低; E. S. Ali 等^[77]通过蚁狮算法实现了复杂装备机械的多级别多层次的备件库存优化配置; 张家维等^[78]建立了航材配置的多目标优化数学模型, 基于帕累托支配概念和蚁狮算法提出了多目标蚁狮算法实现航材配置优化模型的求解。

基于优化算法的航材配置管理在计算效率上具有一定的优势, 且对于维度较高的问题不敏感, 但是, 由于求解过程中初值的选取具有随机性, 导致分析结果具有一定的离散性。此外, 关于航材配置管理的优化算法研究, 目前仍停留在理论研究方面, 考虑的工程因素尚不全面。以上两类航材配置管理技术各有特点, 在航材配置管理的工程应用中, 应当根据航材配置问题的特征和数据基础, 分析并选择合理的方法。民用飞机航材配置管理技术两类方法的对比分析如表 2 所示。

表 2 民用飞机航材配置管理技术研究现有方法比较

Table 2 Comparison of existing methods for civil aircraft spare parts configuration management

方法	数据源	理论基础	优点	不足	应用
解析方法	维修级别、飞行小时、机队规模、重要度、飞机停机时间等	METIRC 模型	充分考虑航材保障等级、产品层级和全寿命周期	精确性较低	具有多级库存的航材配置问题
优化算法	各航材仓库供应量、供应时间、系统保障率、维修周期、航材成本等	遗传算法 粒子群算法 量子粒子群算法 启发式算法	求解较快可适用于高维问题	初值选取具有主观性和随机性 工程可行性需验证	多目标优化的航材配置问题

3 民用飞机航材预测与配置管理技术发展趋势分析

随着全球民航事业的发展,民用飞机机队规模不断扩张,其航材预测与配置管理成为综合后勤保障的重要关注点。为了有效实现民用飞机航材的精准预测和合理配置管理,在前期研究和对国内外相关文献追踪的基础上,梳理出民用飞机航材预测与配置管理技术发展趋势愿景,如图4所示。

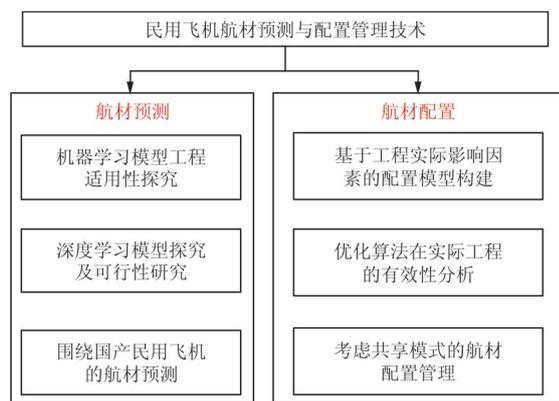


图4 航材预测与配置管理技术发展趋势愿景

Fig.4 Development trend of spare parts prediction and configuration management technology

从图4可以看出:民用飞机航材支援体系工作主要包括航材预测和航材配置管理,其相关技术发展趋势具体可描述为:

(1) 航材预测技术。随着民用飞机运营实际增长,以及相关的航材历史消耗数据积累,尽管机器学习模型在航材预测方面表现出一定的优势,但是结合实际数据的机器学习模型的航材预测适用性仍是下一步研究的重点;随着近年来大数据理论的快速发展,将深度学习模型应用于航材预测以及其可行性研究,有望成为下一步实现航材科学预测的可行途径;当前国产民用飞机已陆续投入运营,借鉴国外成熟机型航材预测方面的工作经验和大数据理论,实现航材精准预测、合理采购和供应将是未来国内民航业的工作重点之一。

(2) 航材配置管理技术。虽然民用飞机航材配置管理已开展了大量研究,但是大多数研究仅从理论的角度进行了分析。因此,为了有效指导工程实际,避免航材紧缺和资源浪费的现象,在满足持续适航要求的条件下,提高维修效率和日利用率,降低运营支持成本,下一步仍需从工程需求的角度

开展航材配置管理技术的研究,如考虑维修工程人员、地面支持设备(Ground Support Equipment,简称GSE)和航材一体化的配置管理技术,针对现有的优化算法,仍需进一步探究其在工程方面的有效性,并在此基础上,研究适用于民用飞机航材配置管理的优化技术。当前各大制造商和运营商正趋于将维修资源进行整合,因此考虑共享模式的航材配置管理技术研究将成为下一阶段的研究热点。

4 结束语

航材预测与配置管理技术一直是民用飞机航材综合管理研究中具有重要意义的研究方向,其合理的预测航材需求量以及高效的航材配置管理极大地影响了利益攸关方(制造商、运营商、维修商等)的运营能力和市场竞争力。本文通过研究民用飞机航材预测技术和航材配置管理技术的发展现状,分别将航材预测技术分为基于时间序列法、基于回归分析法和基于机器学习模型三大类,将航材配置管理技术分为基于解析方法和基于优化算法两大类,并对上述方法的研究现状进行逐一论述,梳理出现有理论方法的优势和不足,为民用飞机航材预测与配置管理技术的工程应用提供了参考。在此基础上,结合深度学习和共享模式在该领域的发展潜力分析了民用飞机航材预测与配置管理技术的发展趋势,为其发展提供了可行的建议和思路,以增强民用飞机维修保障体系的完善程度,有助于增强国产民用飞机的市场竞争力,提升民用飞机运行维护支持能力。

参考文献

- [1] 成磊. 未来10年全球航空维修市场预测[J]. 航空维修与工程, 2012, 13(3): 26-28.
CHENG Lei. Global aviation maintenance market forecast in the next 10 years[J]. Aviation Maintenance and Engineering, 2012, 13(3): 26-28. (in Chinese)
- [2] 马援. 成为深受客户信赖的终身服务提供商——访波音民用飞机集团中国事务副总裁庄博润和波音中国支援部总监潘迈克[J]. 国际航空, 2008, 11(2): 23-24.
MA Yuan. Becoming a lifelong service provider trusted by customers — interview with Mr. ZHUANG Borun, vice president of China Affairs of Boeing Civil Aircraft Group, and PAN Mike, director of Boeing China Support Department[J]. International Aviation, 2008, 11(2): 23-24. (in Chinese)
- [3] 《空运商务》编辑部. 空客将向川航提供“空中客车飞行小时

- 服务”[J]. 空运商务, 2010, 2(5): 24.
Editorial of *Air Transport & Business*. Airbus will provide “Airbus flight hour service” to Sichuan Airlines[J]. *Air Transport & Business*, 2010, 2(5): 24. (in Chinese)
- [4] 任敏, 陈全庆, 沈震, 等. 备件供应学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
REN Min, CHEN Qingquan, SHEN Zhen, et al. Spare parts supply [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013. (in Chinese)
- [5] 郭峰, 强海滨. 航材统计预测与决策[M]. 北京: 国防工业出版社, 2017.
GUO Feng, QIANG Haibin. Statistical prediction and decision-making of spare parts[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2017. (in Chinese)
- [6] 孙友强. 时间序列数据挖掘中的维数约简与预测方法研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014.
SUN Youqiang. Research on dimensionality reduction and prediction methods in time series data mining[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014. (in Chinese)
- [7] 闫明月. 时间序列相似性与预测算法研究及其应用[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
YAN Mingyue. Study and application of time series similarity and forecasting algorithm[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014. (in Chinese)
- [8] 左山, 鲁晶晶, 田磊, 等. 简单移动平均预测法在航材保障中的应用[J]. 科技信息, 2008(30): 87-88.
ZUO Shan, LU Jingjing, TIAN Lei, et al. Application of simple moving average prediction method in spare parts support[J]. *Science and Technology Information*, 2008(30): 87-88. (in Chinese)
- [9] 董健康, 张明水, 陈静杰. 基于季节特性的航材备件定量订货模型[J]. 中国民航大学学报, 2007, 25(2): 45-47.
DONG Jiankang, ZHANG Mingshui, CHEN Jingjie. Quantitative order model for air material spare parts based on seasonal characteristics[J]. *Journal of Civil Aviation University of China*, 2007, 25(2): 45-47. (in Chinese)
- [10] JOHNSTON F R, BOYLAN J E. Forecasting for items with intermittent demand[J]. *Journal of the Operational Research Society*, 1996, 47(1): 113-121.
- [11] WILLEMAIN T R, SMART C N, SCHWARZH F. A new approach to forecasting intermittent demand for service parts inventories[J]. *International Journal of Forecasting*, 2004, 20: 375-387.
- [12] 张大鹏, 任聪, 张戎, 等. 基于时间序列分析的易消耗性备件需求预测研究[J]. 物流技术, 2009, 21(5): 58-61.
ZHANG Dapeng, REN Cong, ZHANG Rong, et al. Study on demand forecasting of consumptive spare parts based on time order model[J]. *Logistics Technology*, 2009, 21(5): 58-61. (in Chinese)
- [13] 刘晓春, 黄爱军, 马芳, 等. 基于指数平滑技术的装备维修备件需求预测[J]. 装备环境工程, 2012, 11(6): 109-112.
LIU Xiaochun, HUANG Aijun, MA Fang, et al. Prediction of equipment maintenance spare parts demand based on exponential smoothing technology[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2012, 11(6): 109-112. (in Chinese)
- [14] 郭峰, 刘臣宇, 李卫灵. 基于指数平滑法的航材消耗定额预测研究[J]. 计算机与现代化, 2012(9): 163-165.
GUO Feng, LIU Chenyu, LI Weiling. Study on prediction of spare parts consumption quota based on exponential smoothing method[J]. *Computer and Modernization*, 2012(9): 163-165. (in Chinese)
- [15] CROSTON J D. Forecasting and stock control for intermittent demands[J]. *Operational Research Quarterly*, 1972, 23(3): 289-303.
- [16] SYNTETOS A A, BOYLAN J E. On the variance of intermittent demand estimates[J]. *International Journal of Production Economics*, 2010, 128(2): 546-555.
- [17] SYNTETOS A A, BOYLAN J E. On the bias of intermittent demand estimates[J]. *International Journal of Production Economics*, 2001, 71(1/3): 457-466.
- [18] 杨杰, 张斌, 华中生. 间断需求预测方法综述[J]. 预测, 2005(5): 70-75.
YANG Jie, ZHANG Bin, HUA Zhongsheng. A review of intermittent demand forecasting methods[J]. *Forecasting*, 2005(5): 70-75. (in Chinese)
- [19] 郭峰, 易壹钺, 史玉敏. 基于灰色预测的航材消耗定额模型[J]. 计算机与现代化, 2011(10): 34-36.
GUO Feng, YI Yaoyue, SHI Yumin. Spares consumption quota model based on gray prediction[J]. *Computer and Modernization*, 2011(10): 34-36. (in Chinese)
- [20] 支乐, 徐光耀. 航材过量消耗时间的灰色预测[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2005, 37(3): 439-441.
ZHI Le, XU Guangyao. The gray forecast about the excessive time consumption of air material[J]. *Journal of Xi'an University of Architecture and Technology (Natural Science Edition)*, 2005, 37(3): 439-441. (in Chinese)
- [21] 刘杨, 任德奎. 基于灰色理论的间断性需求备件预测方法[J]. 四川兵工学报, 2011, 32(4): 27-29.
LIU Yang, REN Dekui. Forecasting method of intermittent demand spare parts based on grey theory[J]. *Journal of Sichuan Military Engineering*, 2011, 32(4): 27-29. (in Chinese)
- [22] 张扬, 胡勇, 王红. 基于改进灰色预测模型的航材消耗预测[J]. 南方农机, 2020, 51(1): 60-62.
ZHANG Yang, HU Yong, WANG Hong. Prediction of spare parts consumption based on improved grey prediction model[J]. *NanFang Agricultural Machinery*, 2020, 51(1): 60-62. (in Chinese)
- [23] 杨冰冰. B777 飞机大修航材库存需求预测研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2014.
YANG Bingbing. Air material stock requirements forecasting of B777 aircraft overhaul[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2014. (in Chinese)
- [24] 万玉成. 基于未确知性的预测与决策方法及其应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2004.

- WAN Yucheng. Research on the methods and applications of forecasting and decision making based on uncertainty [D]. Nanjing: Southeast University, 2004. (in Chinese)
- [25] 刘信斌, 沐爱琴, 辛安. 基于 ARIMA 模型的航材需求预测[J]. 价值工程, 2016, 35(24): 250-251.
LIU Xinbin, MU Aiqin, XIN An. Air material demand forecast based on ARIMA model[J]. Value Engineering, 2016, 35(24): 250-251. (in Chinese)
- [26] 毕钊, 侯胜利. 基于 R 语言 SARIMA 模型的航材需求预测分析[J]. 价值工程, 2019, 38(15): 151-154.
BI Zhao, HOU Shengli. Prediction and analysis of spare parts demand based on SARIMA model of R language[J]. Value Engineering, 2019, 38(15): 151-154. (in Chinese)
- [27] GHOBBAR A A, FRIEND C H. Sources of intermittent demand for aircraft spare parts within airline operations[J]. Journal of Air Transport Management, 2002, 8(4): 221-231.
- [28] GHOBBAR A A, FRIEND C H. Evaluation of forecasting methods for intermittent parts demand in the field of aviation: a predictive model[J]. Computers & Operations Research, 2003, 30(14): 2097-2114.
- [29] GHOBBAR A A. Forecasting intermittent demand for aircraft spare parts: a comparative evaluation of methods[J]. Journal of Aircraft, 2004, 41(3): 665-673.
- [30] TEUNTER R H, DUNCAN L. Forecasting intermittent demand: a comparative study[J]. Journal of the Operational Research Society, 2009, 60(3): 321-329.
- [31] TEUNTER R H, ARIS A, SYNTETOS M, et al. Intermittent demand: linking forecasting to inventory obsolescence[J]. European Journal of Operational Research, 2011, 214(3): 1174-1179.
- [32] 汪娅, 王超峰. 基于约束调度的消耗性航材备件需求预测分析[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(2): 243-247.
WANG Ya, WANG Chaofeng. Demand forecast analysis of expendable aeronautical materials spare parts based on constraint scheduling[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(2): 243-247. (in Chinese)
- [33] 陈振林, 薛永亮. 基于非参数回归的航材消耗预测模型研究[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(6): 132-135.
CHEN Zhenlin, XUE Yongliang. Research on prediction model of aviation material consumption based on nonparametric regression[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(6): 132-135. (in Chinese)
- [34] 杨仕美, 郭建胜, 董兴陆, 等. 基于 LSSVM 和信息熵的航材备件组合预测方法[J]. 火力与指挥控制, 2012, 37(9): 154-157.
YANG Shimei, GUO Jiansheng, DONG Xinglu, et al. Combination prediction method for aerial spare parts based on LSSVM and entropy[J]. Fire Control & Command Control, 2012, 37(9): 154-157. (in Chinese)
- [35] GUO F, DIAO J, ZHAO Q H, et al. A double-level combination approach for demand forecasting of repairable airplane spare parts based on turnover data[J]. Computers and Industrial Engineering, 2017, 110: 92-108.
- [36] 牛余宝, 王晓坤, 赵艳华. 基于支持向量机的飞机备件消耗预测研究[J]. 长春大学学报, 2012, 22(6): 631-633.
NIU Yubao, WANG Xiaokun, ZHAO Yanhua. Research on the prediction of aircraft spare parts consumption based on support vector machine[J]. Journal of Changchun University, 2012, 22(6): 631-633. (in Chinese)
- [37] HUA Z S, ZHANG B. A hybrid support vector machines and logistic regression approach for forecasting intermittent demand of spare parts[J]. Applied Mathematics and Computation, 2006, 181(2): 1035-1048.
- [38] 薛彦轶, 刘晓东. 基于最小二乘支持向量机的航材备件需求建模[J]. 先进制造与管理, 2007, 26(6): 27-29.
XUE Yanyi, LIU Xiaodong. Demand model of aeronautical material spare parts based on least squares support vector machines[J]. Advanced Manufacture and Management, 2007, 26(6): 27-29. (in Chinese)
- [39] 孙伟奇, 周斌, 史玉敏, 等. 基于 LS-SVM 的新机备件需求预测[J]. 兵工自动化, 2018, 37(7): 71-73, 78.
SUN Weiqi, ZHOU Bin, SHI Yumin, et al. Demand forecast of new machine spare parts based on LS-SVM [J]. Ordnance Automation, 2018, 37(7): 71-73, 78. (in Chinese)
- [40] 韩玉, 张作刚, 张海军. 基于粗糙集和神经网络的舰载直升机航材消耗预测研究[J]. 舰船电子工程, 2017, 37(9): 96-99.
HAN Yu, ZHANG Zuogang, ZHANG Haijun. Prediction of aircraft material consumption of shipboard helicopter based on rough set and neural network[J]. Naval Electronic Engineering, 2017, 37(9): 96-99. (in Chinese)
- [41] 钟颖, 汪秉文. 基于遗传算法的 BP 神经网络时间序列预测模型[J]. 系统工程与电子技术, 2002, 22(4): 78-92.
ZHONG Ying, WANG Bingwen. BP network sequence prediction model based on genetic algorithm[J]. Systems Engineering and Electronics, 2002, 22(4): 78-92. (in Chinese)
- [42] VANDER A S, BOUTE R N, SYNTETOS A A. Forecasting spare part demand with installed base information: a review[J]. International Journal of Forecasting, 2019, 35(1): 181-196.
- [43] 孙蕾. 民用飞机多级库存配置方法与管理研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
SUN Lei. Research on multi-echelon inventory allocation method and management for civil aircraft [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013. (in Chinese)
- [44] LEVNER E, PERLMAN Y, CHENG T C, et al. A network approach to modeling the multi-echelon spare-part inventory system with backorders and interval-valued demand [J]. International Journal of Production Economics, 2011, 132(1): 43-51.
- [45] BOYLAN J E, SYNTETOS A A. Spare parts management: a review of forecasting research and extensions[J].

- IMA Journal of Management Mathematics, 2010, 21(3): 227-237.
- [46] 李连, 孙聪, 苏涛. 改进 BP 网络在航材需求预测中的应用[J]. 计算机与现代化, 2012(8): 179-182.
LI Lian, SUN Cong, SU Tao. Application of improved BP network in spare parts demand prediction[J]. Computer and Modernization, 2012(8): 179-182. (in Chinese)
- [47] KENNEDY W J, PATTERSON L W, FREDENDALL L D. An overview of recent literature on spare parts inventories[J]. International Journal of Production Economics, 2002, 76: 201-215.
- [48] SHERBROOKE C C. Optimal inventory modeling of systems: multi-echelon techniques[M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [49] 郑超. 基于虚拟库存管理的航材备件库存共享优化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
ZHENG Chao. Research on optimization of spare parts inventory sharing based on virtual inventory management[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015. (in Chinese)
- [50] RUAN M Z, WANG R, KONG Q F. Mission-oriented configuration model of aircraft carrying spares and dynamic optimization policy[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016, 33(5): 626-632.
- [51] GU J Y, ZHANG G Q, LI K W. Efficient aircraft spare parts inventory management under demand uncertainty[J]. Journal of Air Transport Management, 2015, 42: 101-109.
- [52] VAN H A, SCARF P A, CAVALCANTE C A V, et al. The effect of maintenance quality on spare parts inventory for a fleet of assets[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2013, 62(3): 596-607.
- [53] TOGWE T, EVELEIGH T J, TANJU B. An additive manufacturing spare parts inventory model for an aviation use case[J]. Engineering Management Journal, 2019, 31(1): 69-80.
- [54] BURNS J F, SIVAZLIAN B D. Dynamic analysis of multi-echelon supply systems[J]. Computers and Industrial Engineering, 1978, 2(4): 181-193.
- [55] MUCKSTADT J A. A model for a multi-item, multi-echelon, multi-indenture inventory system[J]. Management Science, 1973, 20(4): 472-481.
- [56] GRAVES T, STEPHEN C. A multi-echelon inventory model for a repairable item with one-for-one replenishment[J]. Management Science, 1985, 31(10): 1247-1256.
- [57] 孙蕾, 左洪福, 刘伟, 等. 基于 VARI-METRIC 的民机关键 LRU 多级库存优化配置模型[J]. 南京: 南京航空航天大学学报, 2013, 45(4): 532-537.
SUN Lei, ZUO Hongfu, LIU Wei, et al. Multi-level inventory optimization allocation model of key LRU of civil aircraft based on VARI-METRIC [J]. Nanjing: Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 45(4): 532-537. (in Chinese)
- [58] 王乃超, 康锐. 基于备件保障概率的多级库存优化模型[J]. 航空学报, 2009, 30(6): 1043-1047.
WANG Naichao, KANG Rui. Optimization of multi-echelon repairable item inventory systems with fill rate as objective[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(6): 1043-1047. (in Chinese)
- [59] 王乃超, 康锐. 多约束条件下备件库存优化模型及分解算法[J]. 兵工学报, 2009, 30(2): 247-251.
WANG Naichao, KANG Rui. An optimization model for inventory spares under multi-constraints and its decomposition algorithm[J]. Acta Armamentarii, 2009, 30(2): 247-251. (in Chinese)
- [60] 孙蕾, 左洪福. 基于 METRIC 的民机初始备件数量确定及配置模型[J]. 中国机械工程, 2013, 24(23): 3200-3210.
SUN Lei, ZUO Hongfu. Optimal allocation modeling for initial spare parts of civil aircraft based on METRIC[J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(23): 3200-3210. (in Chinese)
- [61] 薛陶. 基于飞机修理级别约束的备件库存优化方法研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2013.
XUE Tao. Study on spare parts inventory optimization method based on aircraft level of repair constraint[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2013. (in Chinese)
- [62] 薛陶, 冯蕴雯, 薛小锋. 装备修理级别与备件库存联合优化模型研究[J]. 机械科学与技术, 2015, 34(6): 963-968.
XUE Tao, FENG Yunwen, XUE Xiaofeng. Research on joint optimizing model of equipment LORA and spare parts inventory[J]. Mechanical Science and Technology, 2015, 34(6): 963-968. (in Chinese)
- [63] 冯蕴雯, 刘奎剑, 薛小锋, 等. 基于 Markov 过程的冗余系统备件与冗余度联合优化[J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41(4): 921-930.
FENG Yunwen, LIU Kuijian, XUE Xiaofeng, et al. Joint optimization of redundancy level and spare parts for redundant system based on Markov process[J]. Systems Engineering and Electronics, 2019, 41(4): 921-930. (in Chinese)
- [64] LIU Y C, FENG Y W, XUE X F, et al. Joint optimization of level of repair analysis and civil aircraft inventory system based on PSO algorithm[J]. Materials Science and Engineering, 2019, 538: 171-179.
- [65] 冯蕴雯, 李永凯, 薛小锋, 等. 考虑不完全维修的民机可修件多级库存规划[J]. 西北工业大学学报, 2017, 35(5): 827-833.
FENG Yunwen, LI Yongkai, XUE Xiaofeng, et al. Multi-level inventory planning of civil aircraft repairable parts considering incomplete maintenance[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2017, 35(5): 827-833. (in Chinese)
- [66] 冯蕴雯, 路成, 薛小锋, 等. 考虑维修比例的民机备件多级库存配置研究[J]. 西北工业大学学报, 2018, 36(3): 582-589.
FENG Yunwen, LU Cheng, XUE Xiaofeng, et al. Study

- on multi-level inventory allocation of civil aircraft spare parts considering maintenance ratio[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2018, 36(3): 582-589. (in Chinese)
- [67] 冯蕴雯, 刘雨昌, 薛小锋, 等. 基于横向供应与维修比例的民机备件配置优化技术研究[J]. 西北工业大学学报, 2018, 36(6): 1059-1068.
FENG Yunwen, LIU Yuchang, XUE Xiaofeng, et al. Research on optimization technology of civil aircraft spare parts allocation based on horizontal supply and maintenance ratio [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2018, 36(6): 1059-1068. (in Chinese)
- [68] 冯蕴雯, 路成, 薛小锋, 等. 基于重要度的民机备件单级初始库存优化配置[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2018, 46(9): 140-148.
FENG Yunwen, LU Cheng, XUE Xiaofeng, et al. Single level initial inventory optimization of civil aircraft spare parts based on importance[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2018, 46(9): 140-148. (in Chinese)
- [69] 刘雨昌. 基于民机LRU划分的备件库存配置优化技术研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2020.
LIU Yuchang. Research on spare parts inventory allocation optimization technology based on civil aircraft LRU division [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2020. (in Chinese)
- [70] 周亮, 李庆民, 彭英武, 等. 动态保障结构下多级多层备件配置优化建模[J]. 航空学报, 2017, 38(11): 150-162.
ZHOU Liang, LI Qingmin, PENG Yingwu, et al. Optimization model for multi-level and multi-echelon spare part allocation in dynamic support structure[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(11): 150-162. (in Chinese)
- [71] 周亮, 彭英武, 李庆民, 等. 串件拼修策略下不完全修复件时变可用度评估建模[J]. 系统工程与电子技术, 2017, 39(5): 1065-1071.
ZHOU Liang, PENG Yingwu, LI Qingmin, et al. Time-varying availability evaluation modeling of incomplete repair parts under cannibalization[J]. Systems Engineering and Electronics, 2017, 39(5): 1065-1071. (in Chinese)
- [72] BATCHOUN P, FERLAND J A, CLEROUX R. Allotment of aircraft spare parts using genetic algorithms[J]. Pesquisa Operacion, 2003, 23(1): 141-159.
- [73] 李圆芳. 基于智能优化算法的航材库存控制优化模型研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2014.
LI Yuanfang. Research on the inventory control and optimization of aviation spares based on intelligent optimization algorithm[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2014. (in Chinese)
- [74] LUIS P P, ORLANDO D. Optimization of the multiechelon system for repairable spare parts using swarm intelligence combined with a local search strategy[C]// International Conference on Computational Science and Its Applications. [S.l.]: Springer, 2014: 315-327.
- [75] 田静, 张恩豪, 付维方. 改进量子粒子群算法在航材初始配置中的应用[J]. 中国民航大学学报, 2018, 36(5): 48-51.
TIAN Jing, ZHANG Enhao, FU Weifang. Application of improved quantum particle swarm optimization algorithm in initial configuration of spare parts[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2018, 36(5): 48-51. (in Chinese)
- [76] 张斯嘉, 郭建胜, 钟夫, 等. 基于费用与完好性的多目标航材存储决策优化[J]. 计算机仿真, 2015, 32(9): 124-127.
ZHANG Sijia, GUO Jiansheng, ZHONG Fu, et al. Decision optimization of multi-objective spare parts storage based on cost and integrity [J]. Computer Simulation, 2015, 32(9): 124-127. (in Chinese)
- [77] ALI E S, ELAZIM S M, ABDELAZIZA Y. Optimal allocation and sizing of renewable distributed generation using ant lion optimization algorithm[J]. Electrical Engineering, 2016, 100(1): 1-11.
- [78] 张家维, 李昊. 多目标蚁狮算法在航材配置优化中的应用研究[J]. 计算机仿真, 2019, 36(7): 71-74.
ZHANG Jiawei, LI Hao. Application of multi-objective ant lion optimizer in optimization of aviation parts allocation [J]. Computer Simulation, 2019, 36(7): 71-74. (in Chinese)

作者简介:

冯蕴雯(1968—),女,博士,教授。主要研究方向:飞机可靠性维修性工程、系统工程。

陈俊宇(1997—),女,硕士研究生。主要研究方向:维修性工程。

刘佳奇(1993—),男,硕士。主要研究方向:飞机可靠性维修性工程。

路成(1989—),男,博士研究生。主要研究方向:可靠性分析、维修性工程。

薛小锋(1983—),男,博士,副研究员。主要研究方向:疲劳寿命可靠性分析、维修性。

(编辑:马文静)