



装备维修保障资源配置综述

齐小刚, 方魁, 宋卫星, 王亚洲, 刘立芳

引用本文:

齐小刚,方魁,宋卫星,王亚洲,刘立芳. 装备维修保障资源配置综述[J]. 智能系统学报, 2022, 17(2): 221–232.

QI Xiaogang, FANG Kui, SONG Weixing, WANG Yazhou, LIU Lifang. Summary of equipment maintenance support resource configuration[J]. *CAAI Transactions on Intelligent Systems*, 2022, 17(2): 221–232.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.11992/tis.202109010>

您可能感兴趣的其他文章

易变数据流的系统资源配置方法

System resource allocation for variable data streams

智能系统学报. 2019, 14(6): 1278–1285 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201908011>

多约束下多无人机的任务规划研究综述

A survey of mission planning on UAVs systems based on multiple constraints

智能系统学报. 2020, 15(2): 204–217 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201811018>

负载敏感的云任务三支聚类评分调度研究

Load-aware score scheduling of three-way clustering for cloud task

智能系统学报. 2019, 14(2): 316–322 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201710004>

受成本约束的电力信息物理相依系统鲁棒性优化设计

Robust optimization design of an electrical cyber-physical system based on constrained cost

智能系统学报. 2020, 15(3): 623–632 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201812034>

多移动机器人协同搬运技术综述

Technologies for cooperative transportation by multiple mobile robots

智能系统学报. 2019, 14(1): 20–27 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201801038>

面向多机器人动态任务分配的事件驱动免疫网络算法

Event-driven immune network algorithm for multi-robot dynamic task allocation

智能系统学报. 2018, 13(6): 952–958 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201707022>

微信公众平台



关注微信公众号，获取更多资讯信息

DOI: 10.11992/tis.202109010

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1538.TP.20211228.0928.002.html>

装备维修保障资源配置综述

齐小刚¹, 方魁², 宋卫星³, 王亚洲¹, 刘立芳⁴

(1. 西安电子科技大学 数学与统计学院, 陕西 西安 710071; 2. 陆军工程大学 军械士官学校, 湖北 武汉 430075; 3. 中国人民解放军 32272 部队 11 分队, 甘肃 兰州 730060; 4. 西安电子科技大学 计算机科学与技术学院, 陕西 西安 710071)

摘要: 装备维修资源配置优化方法的研究对提升维修保障效率具有不可估量的作用, 然而当前装备维修保障系统的维修资源的研究已经不能满足多中心系统高效保障的实际需求。因此, 本文详细分析了装备维修保障维修资源配置优化问题的相关研究。首先概述了多中心装备保障系统主要包括维修任务预测、维修资源配置和多中心维修任务调度 3 个任务模块, 并以此确定了维修保障资源配置流程。然后重点针对维修人员和维修备件资源配置优化问题参数、理论方法以及研究现状进行了综述。最后针对多中心维修保障系统资源研究的缺陷对未来发展进行了展望, 形成一种新的研究思路, 为后续开展多中心系统资源配置优化研究提供参考。
关键词: 多中心系统; 装备维修保障; 任务预测; 资源配置; 任务调度; 维修人员; 备件; 优化方法
中图分类号: TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4785(2022)02-0221-12

中文引用格式: 齐小刚, 方魁, 宋卫星, 等. 装备维修保障资源配置综述 [J]. 智能系统学报, 2022, 17(2): 221-232.

英文引用格式: QI Xiaogang, FANG Kui, SONG Weixing, et al. Summary of equipment maintenance support resource configuration[J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2022, 17(2): 221-232.

Summary of equipment maintenance support resource configuration

QI Xiaogang¹, FANG Kui², SONG Weixing³, WANG Yazhou¹, LIU Lifang⁴

(1. School of Mathematics and Statistics, Xidian University, Xi'an 710071, China; 2. Ordnance Sergeant School, Army Engineering University, Wuhan 430075, China; 3. Chinese People's Liberation Army 32272 Troop, Lanzhou 730060, China; 4. School of Computer Science and Technology, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: A research on the equipment maintenance resource configuration optimization method significantly improves maintenance efficiency. However, the maintenance resource of the current equipment maintenance guarantee system can no longer meet the actual needs of a high-efficiency guarantee for the multicenter system. Therefore, this paper analyzes the related research of equipment maintenance and maintenance resource allocation. The multicenter equipment support system mainly includes three task modules, maintenance task prediction, maintenance resource allocation, and multicenter maintenance tasks scheduling. These tasks are the basis for determining the maintenance support resource configuration process. Then, a summary is submitted focusing on the maintenance personnel and parameters of maintenance spare parts resource configuration optimization problem, as well as on the theoretical method and research status. Finally, considering the shortcomings in the multicenter maintenance system resource research, a future development trend is proposed, forming a new thought sequence for the research and providing a reference for the research of subsequent multicenter system resource allocation optimization.

Keywords: multicenter system; equipment maintenance; task prediction; resource allocation; task scheduling; repair personnel; spare part; optimization method

随着武器装备高新技术含量的不断增加, 装

备的功能、结构变得越来越复杂, 所需要的维修资源种类也越来越多, 装备维修保障活动开始由传统粗放型、经验型转向精确型、节约型。如何利用大数据、人工智能等技术进行装备维修资源

配置优化已成为当前维修人员研究的热点。美军的装备后勤管理在20世纪50年代最先使用了电子计算机技术,管理效果显著优于其他国家的非自动化管理系统,不久之后苏联及周边国家也开展了后勤自动化的研究。20世纪80年代,巴基斯坦为适应空军修理厂和备件仓库的管理,开始采用自动化后勤管理系统对飞机的维修资源进行优化,并取得了良好效果。我国从20世纪80年代后期也开始了后勤自动化建设,并在资源配置优化上进行了大量的研究,但多集中于大型企业,部队相关研究相对较少^[1]。故本文对多中心维修资源配置进行了综述,以促进我国装备维修保障资源配置的优化及发展。

1 维修资源配置过程

1.1 多中心系统维修保障过程

多中心系统装备维修保障框架如图1所示。

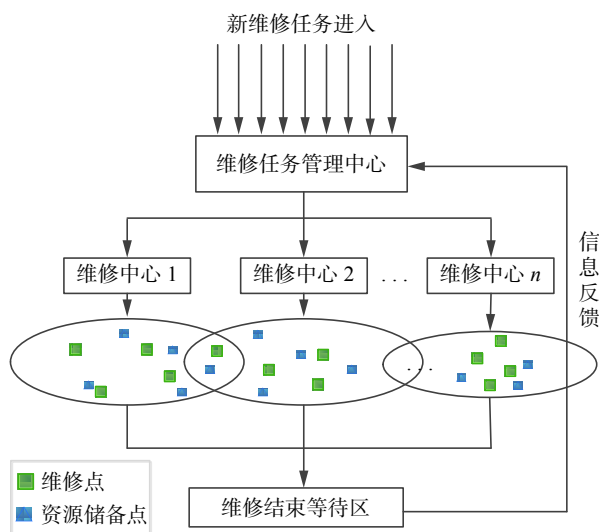


图1 多中心系统维修保障框架

Fig.1 Multi-center system maintenance process framework

第一部分:多中心维修任务预测模块。任务管理中心负责登记每一条维修任务所属的区域、部队以及维修类型。所有维修任务按照需要维修种类、优先级等形成维修任务队列,按照一定的优化条件对送修过来的武器装备进行维修任务分配,将需要维修的武器装备分配至各个维修中心。维修中心每隔一定周期对维修中心的任务队列进行更新,并预测下一周期的维修任务。按照维修任务的优先等级、维修效率、以及与维修中心距离远近等原则进行分配,建立评价指标、并进行任务分配的结果评价,预测分配排队等待时间。

第二部分:多中心维修资源配置模块。维修资源分配中心根据各个维修中心所分配的维修任

务方案以及相关参数,如维修任务量、备件需求率、到维修点的配送距离、人员信息、额定维修时间等信息,按照一定的优化条件对维修资源进行配置优化,将维修人员分配至各个维修点,维修备件分配至各个资源储备点。

第三部分:多中心维修任务调度。根据第一部分资源预测结果,得到每个维修中心的不同维修点的资源供给量,根据各维修点资源供给量、各维修任务所需资源量、各维修点与维修中心的距离以及维修任务优先级等因素,将维修任务调度至各个维修点进行调度优化,计算维修任务在各维修点的等待时间及维修时间。将维修任务完成情况反馈于维修任务管理中心以便及时调整。

1.2 维修保障资源配置流程

维修资源的配置优化与装备使用和维修保障所要达到的目的紧密相连。即,要以最经济的人力和物力消耗,最快的速度为部队提供高强度、不间断的保障,即维修资源配置追求的是最佳的军事经济效益。维修资源配置基本原则主要包括:

- 1) 满足平时和战时对装备维修保障的需求。
- 2) 尽量降低维修资源的费用。
- 3) 尽量选用标准化、系列化、通用化的设备。

维修资源配置的根本原则是要使维修资源配置与维修对象的维修需求相匹配,防止个别资源供不应求,个别资源闲置浪费,即要最大限度地提高资源的利用率。但维修对象的维修需求是不断变化的,其中由于事故或其他不可抗拒的原因造成装备损坏的维修需求是随机的,因此只有柔性的维修资源配置才能满足维修对象的资源需求。维修资源配置过程如图2所示,首先,对维修对象进行维修需求分析,确定维修备件和人员需求;其次,维修备件和人员需求与当前维修备件和人员进行关联分析;再次,对维修备件和人员进行配置优化,分别对备件运行量、备件供需、维修人员和维修组数量进行优化;最后,根据配置优化结果,制定装备维修备件和人员保障计划。

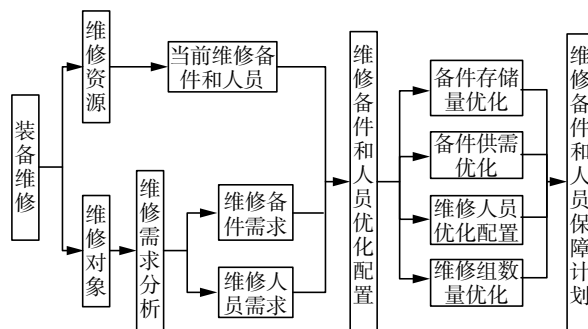


图2 维修保障资源配置流程

Fig.2 Maintenance resource configuration process

2 维修人员配置

2.1 问题参数

维修人员是维修资源中的关键要素,参照《军事训练大纲》的标准,按照专业和技术级别对维修人员进行分类。通常维修人员技术等级越高,培训周期越长、人员成本越高,维修技能水平越高,配备数量越少,对维修任务的影响也就越大,在基本维修单元编配时应重点考虑。一般对维修人员作如下假设:

1) 不同专业、不同等级的维修人员有明确的技能和职责分工,不存在相互通用、替代的情况。

2) 不考虑由维修人员年龄、身体状况等差异,认为同专业、同等级的维修人员能力相同。

对维修资源配置问题各种参数进行总结分析,建立问题参数体系,是优化模型建立的重要基础。维修人员约束参数主要包含了人力资源的种类和数量约束(表1)、人力资源利用率约束(表2)、维修任务约束(表3)、多中心维修保障系统还涉及到共享资源约束(表4)。最小维修组织单位的综合性能可通过具有的维修规模和服务能力来衡量。维修规模指完成维修任务所需的资源总数量,维修服务能力指对维修任务的完成能力。维修人员目标参数见表5。

表1 种类和数量约束

Table 1 Type and quantity constraints

字母	名称	含义
N^P	人员专业种类	维修人员专业种类的总数量
G_i	人员等级	第 <i>i</i> 专业维修人员技术等级
RN_{ij}^p	各类人员数量	第 <i>i</i> 专业第 <i>j</i> 等级维修人员总数量
rc_{ij}^p	各类人员成本	第 <i>i</i> 专业第 <i>j</i> 等级维修人员的平均成本(工资及培训成本之和)
rv^p	人员平均体积	维修人员的平均体积
rw^p	人员平均重量	维修人员的平均体重
RN_i^p	各专业人员总数量	第 <i>i</i> 专业维修人员总数量 $RN_i^p = \sum_{j=1}^{G_i} RN_{ij}^p$
RN^p	人员总数量	$RN^p = \sum_{i=1}^{N^p} \sum_{j=1}^{G_i} RN_{ij}^p$
RC^p	人员总成本	$RC^p = \sum_{i=1}^{N^p} \sum_{j=1}^{G_i} (RN_{ij}^p \cdot rc_{ij}^p)$
RV^p	人员总体积	$RV^p = rv^p \sum_{i=1}^{N^p} \sum_{j=1}^{G_i} RN_{ij}^p$
RW^p	人员总重量	$RW^p = rw^p \sum_{i=1}^{N^p} \sum_{j=1}^{G_i} RN_{ij}^p$

表2 利用率约束

Table 2 Utilization constraints

字母表示	名称	含义
su_{ij}^p	人员有效利用率	第 <i>i</i> 专业第 <i>j</i> 等级维修人员实际工作时间与总时间的比值
EN_{uij}	基本维修单元对人员的有效占用率	第 <i>i</i> 专业第 <i>j</i> 等级维修人员实际参与第 <u>i</u> 类基本维修单元执行维修任务的时间与第 <u>i</u> 类基本维修单元工作时间的比值
EN_{ij}	每类人员的有效占用率	第 <i>i</i> 专业第 <i>j</i> 等级维修人员实际执行任务时间被各类基本维修单元占用时间总和的比值
EN^p	全部人员的有效占用率	全部维修人员被有效占用的比率等于每类维修人员有效占用率的均值 $EN^p = \sum_{i=1}^{N^p} \sum_{j=1}^{G_i} EN_{ij} / \sum_{i=1}^{N^p} \sum_{j=1}^{G_i} EN_{ij}$
ou_{ij}^p	人员占用率	第 <i>i</i> 类专业第 <i>j</i> 等级维修人员被基本维修单元占用的工时数与其在任务期间所具有的总工时数的比值

表 3 维修任务约束参数

Table 3 Maintenance task constraint parameters

字母	名称	含义
M	维修任务种类	全部维修任务的数量
mr_{mij}^P	维修人员需求	第 m 类维修任务所需第 i 专业第 j 等级的维修人员数量, 当第 m 类维修任务不需要该种人员时 $mr_{mij}^P = 0$
mt_m	维修持续时间	在维修任务所需资源都准就绪的情况下, 完成维修任务所需的平均时间, 即维修任各对各种维修资源的占用时间
λ	总维修任务强度	全部维修任务单位时间内发生数量的平均值
P_m	维修发生概率	第 m 类维修任务的发生概率, 且有 $\sum_{m=1}^M P_m = 1$
λ_m	每类维修强度	第 m 类维修任务单位时间内发生数量的平均值, $\lambda_m = \lambda P_m$
T^*	总维修时限	全部维修任务的平均完成时间要求
T_m^*	每类维修时限	第 m 类维修任务的平均完成时间要求

表 4 共享资源约束

Table 4 Shared resource constraints

字母	名称	含义
cr_{uij}^P	人员共享种类	第 i 专业第 j 等级的维修人员是否作为第 u 类基本维修单元的共享资源, 则 $cr_{uij}^P = 1$, 否则0
cg_{ij}^P	人员共享度	第 i 专业第 j 等级的维修人员被几种基本维修单元共同使用。 $cg_{ij}^P = \sum_{u=1}^U cr_{uij}^P$
cn_{ij}^P	人员共享数量	第 i 专业第 j 等级的维修人员需作为共享资源的数量

表 5 目标参数

Table 5 Target parameters

字母	名称	含义
DR^P	人员需求总数量	完成维修任务所需的全部维修人员人数
DC	人员需求总成本	购置完成维修任务所需的各种维修资源所需的总费用
DF	运输台次	运输所需的全部维修人员动用的某类运输工具的台次数
XT	总任务的平均完成时间	最小维修单元完成各类维修任务的平均维修时间, 含任务持续时间和排队等待时间
XT_m	第 m 类任务的平均完成时间	最小维修单元完成第 m 类维修任务的平均维修时间, $XT_m = WT_m + mt_m$
WT	总任务的平均等待时间	各类维修任务到达后排队等候维修资源的平均时间
WT_m	第 m 类任务的平均等待时间	第 m 类维修任务到达后排队等候维修资源的平均时间
μ	系统平均服务率	最小维修单位对维修任务的平均服务速度

2.2 维修人员配置研究现状

维修人员配置的优化可以使维修机构拥有合理的技术人员结构和高效的维修效率, 对发挥资源效能具有重要的意义。然而现有人员优化研究主要集中于企业或工业背景上^[2-3], 所建立的模型也主要针对非维修性的专业技术人员, 这并不适用于军用装备的维修保障人员优化问题。装备维修保障人力资源具体包括装备技术专家、装备维

修指挥人员、装备维修技术操作人员等, 其配置需求通常涉及维修人员的数量、专业编组、技术等级等, 目前主要有以下几种方法。

2.2.1 使用与维修任务分析法

该方法以维修工时数为主要分析数据, 通过相应分析确定各维修专业人员的数量^[4]。使用与维修任务分析法的一般思想如下。具体流程如图 3 所示。

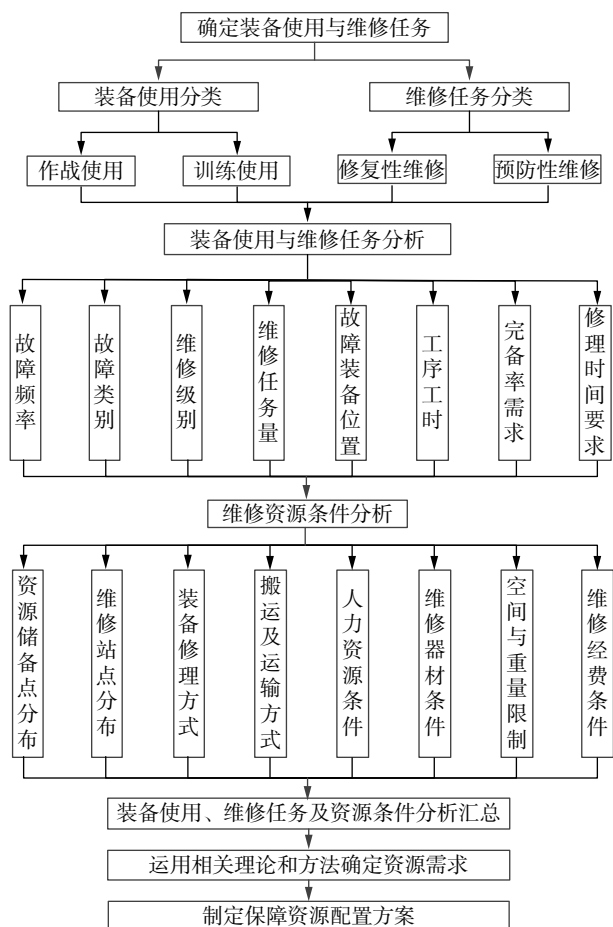


图3 使用与维修任务分析法

Fig. 3 Using and maintenance task analysis method

首先,对装备维修保障典型任务剖面进行分析,通过相关性分析找出维修保障工作中维修人员配置影响因子;

然后,利用概率论、排队法^[5-6]等理论来分析、确定维修活动中与人力资源配置相关的要素,并以此为基础建立维修人员配置模型;

最后,根据实际问题特点和模型结构设计合适的算法进行求解。

维修人员配置的优化研究通常从装备的维修任务分析,准确的分析是制订装备保障方案的前提^[7]。其主要包括以下内容:

1) 根据装备的使用和维修任务的类型,确定使用与维修任务的内容。装备使用包括作战使用和训练使用,维修任务主要分为修复性维修和预防性维修。

2) 对装备使用和维修任务进行详细分析^[8]。修复性维修的工作内容主要包括故障类别、等级诊断评估、维修任务量的计算、工序工时和故障装备位置分析等;而对于预防性维修,还应做到一定程度的故障预测,主要包括自然随机故障频率、计划维修间隔期、作战损坏频率等。装备的使用应考虑维修保障时间约束以及装备完备率。

3) 对维修资源条件进行详细分析^[9]。维修资源主要包括人力资源和物力资源。根据装备的修理方式,包括换件修理和修复性修理。主要考虑维修人员的专业、等级和数量、工作时长要求、维修器材种类和数量、维修经费、维修空间和重量限制等。另外针对多中心的维修保障系统,还应考虑维修资源储备点的分布、维修站点的分布以及各站点的搬运和运输方式等实际条件。

4) 运用相关理论和方法确定资源需求,进行资源配置。采用基准比较法、工作与技能分析法、时线分析法^[10]等确定维修人员、备件等资源优化方案,以保证最大限度地满足装备保障需求。

2.2.2 维修单元法

该法将“规定时间内、完成规定保障任务、实现最佳保障效能的最少保障资源组合”定义为一个最小维修单元,通过确定装备最小维修单元人数和工时标准建模,计算保障人力的需求。基本维修单元优化的目的是合理分配维修资源,尽量避免维修资源使用闲置和维修资源调度冲突,从而提高维修资源的利用率。近年来,有关科学确定基本维修单元的维修人员和保障装备等已成为装备保障研究领域的热点和难点问题。文献^[11]提出了基于维修任务的基本维修单元确定方法,文献^[12]基于最小维修单元建立了维修人员数量需求预测模型,给出了维修人员预测方法。维修单元法应用价值较强,但不同任务背景下最小维修单元的确定是该法运用的基础和关键。

2.2.3 数学规划法

数学规划是运筹学的一个重要分支,并已被广泛应用到各种领域。正确建立优化问题的数学规划模型,必须做到充分理解问题本身,所建立的模型能与实际紧密联系,结合实际情况对所提出的问题进行求解,通用性、推广性较强。如文献^[13-14]根据实际问题的经验数据,利用工时估算法^[15]计算了故障装备的维修保障工作,并以此建立了维修人员数量分配模型。文献^[9]分析了船舶装备影响因素和制约因素,建立了以累积修复时间最小的维修人员规划模型。数学规划法将结构优化问题归纳为一个数学规划问题,然后用数学规划法来求解。对于简单的线性规划和整数规划,可通过单纯形法、分支定界法、匈牙利法等方法进行求解。目前数学软件已发展得比较成熟,可借助LINGO或MATLAB软件进行求解。然而根据实际问题建立的数学规划模型往往结构复杂且数据量大,智能优化算法成为求解复杂问

题模型重要工具。如文献[16]基于保障成本、保障时间和物资利用率3个目标,建立了装备维修物资协同分配多目标优化决策模型,设计了基于引导因子的改进粒子群优化算法,并对模型进行求解。文献[17-18]通过建立多约束规划模型并利用智能算法对抢占式资源受限项目调度问题(PRCPS)进行了研究。

维修保障资源配置数学规划模型的建立应遵循以下原则:

1) 简化原则:实际的装备维修保障系统是多变量、多层次的复杂系统,建立数学模型需要对原型进行必要的简化。

2) 可推导原则:通过对数学模型的研究可以推导出一系列确定的结论。如果数学模型不能进行数学推导,不能确定应用原型的结果,这个数学模型就是无意义的。

3) 相似性原则:数学模型是维修资源配置原理的数学表达形式。因此,数学模型与实际原型应有“相似性”,合理地运用与原型“相似”的数学公式和解析图形是建模关键。

2.2.4 其他方法

除了上述方法,还有部分学者将计算机仿真技术、相似系统法、智能优化算法等方法理论和引入到维修保障人员数量确定的研究中。例如李岩等^[19]针对军用飞机维修保障人员数量在战时难以科学确定的问题,提出一种基于新型兰彻斯特空战模型的战时军用飞机维修保障人员数量确定方法。杨春辉等^[20]进行了基于系统动力学演化仿真的方法,分析了人员投入、维修人员在研发与设计中的参与度等主要参数的灵敏度。张宏远等^[21]提出了一种基于免疫算法的装备维修人员调配方法,为提高维修人员维修工作安排合理性、时效性与人员作业量的均衡性。另外,针对新研装备的维修人员配置,可以使用相似系统法^[22]进行研究,计算方法包括 Jaccard 法、McAnley 法等^[23-24]。

3 维修备件库存配置

3.1 库存系统

掌握维修保障库存系统内维修备件的流动情况是分析库存变化的关键,也是库存管理优化的前提。现实中,装备维修保障库存系统结构多种多样,一般根据维修备件的流向和通路数将库存系统分成如下几类^[25]:

1) 串联式库存:仓库对需求点一对一供应。每一周期初需求点向上级仓库订货,仓库根据订

货与自身库存情况发货。若需求点未满足需求,则等下一周期补货。

2) 分布式库存:仓库对需求点一对多供应。一般上游仓库少,下游仓库多。供应有序、职责分明、统分结合^[26],是装备维修保障中最常见的库存系统。

3) 聚敛式库存:仓库对需求点多对一供应。

4) 网络式库存:仓库对需求点多对多供应。

维修备件库存系统由补货、存储和配送3个环节共同组成,该系统是库存优化问题的研究对象。基层仓库由于直接面向维修活动,库存状态直接影响着作战任务。因此,基层仓库维修备件的库存控制要求一般比较严谨,需要根据补货提前期设定安全库存,以防止因缺货造成备件供应不足。而基地仓库间接影响维修活动,可采用较为宽松的策略。因此,在建模时,不同类型的库存系统需设定不同的基本假设。一般来说,装备维修保障备品备件申请模式是从基层部队逐级上报的模式,也存在少数的越级直达供应,一般表现为军区越过中继级仓库直接对基层级仓库供应。还有少部分同级横向备件调度模式,装备维修保障备品备件库存系统的运营过程如图4所示。

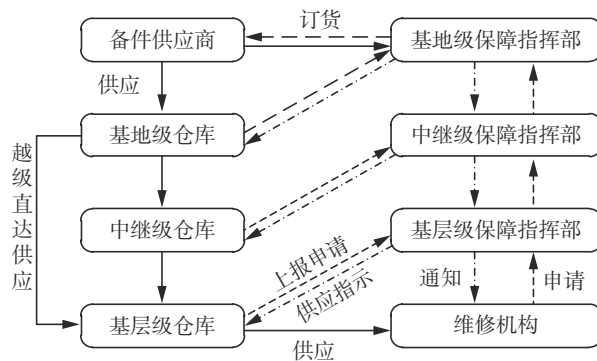


图4 库存系统运营过程

Fig. 4 Inventory system operation process

3.2 影响因素

维修备件的库存系统在运行过程中受各种因素的影响,因此为制定科学的维修备件库存决策方案,首先应了解库存决策优化的影响因素,主要影响因素如表6所示。

1) 信息能力:数据信息是实现库存决策优化的基础和主要依据。信息的采集能力、传递能力以及反馈能力是主要的影响因素,如果能实时共享这备件的需求信息和库存信息,各级维修备件保障部门就可以及时调整仓库的补货和配送策略。因此信息的准确性、及时性以及信息技术的应用是库存优化的关键。现有的信息技术主要包括全资可视化系统、射频技术、信息网络等^[27-28]。

表6 库存决策影响因素
Table 6 Factors influencing inventory decision making

影响因素	参数
信息能力	采集能力、传递能力、反馈能力…
备件需求	备件需求量、紧迫程度、需求品种…
备件属性	备件单价、备件自然属性、可代替性、备件重要度…
经济性指标	补货提前期、补货费用、存储费用…
保障性指标	满足率、缺货数、需求等待时间…

2) 备件需求: 维修备件需求的品种和数量是库存决策的直接对象, 备件需求的紧迫程度是库存决策的重要依据。装备维修备件的品种、消耗量以及紧迫程度受装备类型、装备数量、作战任务以及人为因素的影响, 根据备件的需求情况进行库存优化直接影响到装备的完好性和战斗力。

3) 备件属性: 一般来说价格高、储存寿命短的维修备件, 库存水平设置较小, 通常采用连续补货策略满足需求。价值较低、需求量大的维修备件, 可采用相对宽松的补货策略。价值低, 需求量小的维修备件重要性也不高, 对于这种类物品, 只需仔细考虑陈旧或变质等问题。因此, 备件的可替代性、重要度、单价以及备件的自然属性也是影响库存决策的重要因素。

4) 经济性指标: 经济性指标主要包括补货费用、存储费用和缺货费用。一般来说, 补货费用越大, 补货次数应该设置越少, 存储费用越高, 维修备件的库存水平相对越少。如果补货提前期较长, 应该存储较多的维修备件以避免在补货时机到达之前发生缺货, 使备件具有较长的需求等待时间。补货费用主要包括补货启动成本、额外补货成本、订单处理成本等; 存储费用主要包括经费占用费用、空间费用和保管费用; 与补货费用和存储费用相比, 准确衡量缺货成本非常困难, 一般采用维修备件的保障指标来分析确定。

5) 保障性指标: 保障性指标是指库存计划满足备件需求的能力, 由维修备件的需求目标设定。如何根据备件的需求条件设置合适的库存以满足一定的服务水平是保证维修保障效能的关键。一般选择备件满足率、需求等待时间、缺货概率、完备率、可用度、期望缺货数等参数衡量保障效能^[29]。

此外, 维修备件库存决策还受存储空间、运输条件、维修人员水平等其他因素影响。备件库存模型一般使用下面两类基础模型进行描述:

1) 基于保障效能的模型: 求解最优的维修备

件库存补货策略, 要求维修备件库存运营费用不超过给定的经费投入, 且系统的服务水平最大化, 即

$$\begin{aligned} \max \quad & P_s(S) \\ \text{s.t.} \quad & C(S) \leq C_0 \end{aligned}$$

式中: $C(S)$ 为库存运营费用函数; C_0 为维修备件库存运营投入的经费; $P_s(S)$ 为库存系统的服务水平函数。

2) 基于经济效能的模型: 求解最优的维修备件库存补货策略, 要求库存系统服务水平不超过给定的服务水平, 且库存系统运营成本最小化, 即

$$\begin{aligned} \min \quad & C(S) \\ \text{s.t.} \quad & P_s(S) \leq P_{s0} \end{aligned}$$

式中, P_{s0} 为给定的库存系统的服务水平。

维修备件的库存系统首先需要满足实际保障要求, 但也不能为了追求保障效能, 不顾及人力、财力的耗费。然而, 基于保障效能与装备的复杂结构息息相关, 对应的数学模型难以构建, 已有的研究成果多是基于经济效能的, 即以经济效能为模型的目标函数, 保障效能指标为约束条件。

3.3 维修备件配置研究现状

库存决策优化的关键是如何合理地安排维修备件的补充及出库的问题, 以达到经济效益和保障效益的统一。维修备件库存策略优化模型主要包括 METRIC (multi-echelon technique recoverable item control) 和 EOQ (economic order quantity)。如果考虑多中心库存系统, 还包括库存-选址、库存-选址-路径等联合优化系列模型。

3.3.1 METRIC 系列模型研究现状

METRIC 系列模型从备件的维修管理角度出发, 适用于连续库存检查策略的库存系统, 研究在给定库存经费的约束下, 如何安排初始库存量, 使预期延迟补货最小。文献 [30-32] 建立基本假设条件——“无限维修渠道”, 即故障件随时到随时修, 不存在维修等待问题, 这种假设条件对于单位时间内故障部件数量较低、维修部门的维修能力充足时, 具有很好的适用性, 但当维修部门维修能力有限且站点维修负载过高时, “无限维修渠道”的假设将不再适用。针对“无限维修渠道”的拓展, Chen 等^[33] 针对抢先维修和非抢先维修的两类保障过程, 利用边际效应算法计算考虑备件维修优先级的库存优化策略。文献 [34] 将可修网络构造为一个封闭的排队系统, 研究了维修服务供应商可修备件库存和维修调度决策问题。文献 [35] 将一种基于 METRIC 理论的混合两级库存分配方法应用于水陆两栖飞机备件分配中, 利用备件的维修成本目标函数以及备件可用性、数

量约束等,建立了备件库存优化模型。在军事系统中,经常用到修复水平分析(LORA)进行网络修复。文献[36]联合LORA与METRIC理论构建了维修备件联合优化模型,并使用OA逼近算法(outer approximation algorithm)进行求解。从已有的研究看来,METRIC系列模型的求解方法多采用的是边际分析法^[37-38],该求解方法是寻求最优解的核心工具。然而,传统的边际分析法求解需要大量的计算时间,为了提高边际算法的求解效率,文献[39]提出了一种新的基于边际分析的启发式算法,显著减少了计算时间,问题规模越大,效果就越显著。现实的维修备件库存问题复杂,可能存在多个决策变量和各种各样的约束条件,边际分析在处理复杂优化问题是具有一定的局限性,如今智能算法已成为求解大规模库存优化问题的有效方法^[31,40]。

3.3.2 EOQ 系列模型研究现状

EOQ系列模型从库存管理角度出发,适用于周期库存检查或连续库存检查方式的库存系统,研究如何调整补货间隔期和补货批量,使备件满足军事需求,且库存费用最小。传统EOQ系列模型采用的库存决策理论仅适用于单品种维修备件的库存优化。通过改进的EOQ模型适用于多品种环境,多品种联合补货比单品种库存决策系统平均节约经费的10%~20%。如今,多品种联合补货问题(joint replenishment problem, JRP)已经成为库存优化研究的热点。文献[41-43]采用定期库存检查方式下的库存决策策略来确定备件需求和供应时机,仿真结果表明其库存决策策略优于广泛的库存决策策略^[44]。文献[45-46]建立了连续库存检查方式下的统一订购策略库存控制模型。文献[47]根据实际问题特点,建立了一种资源约束下的军用机消耗品联合补货模型,并提出了一种改进的自适应遗传算法。文献[48]在文献[49]的研究基础上,提出了一种新的联合补货与配送问题(joint replenishment and distribution, JRD),并采用改进的RAND方法求解JRD模型,结果表明,改进的RAND方法在求解精度和求解效率上都更优于遗传算法与差分进化算法。如今,JRD模型同样是库存优化研究的重点。JRD已经被证明是NP难问题,文献[50-51]针对JRD复杂的数学特性,设计了改进的差分进化算法并求解了模型。实验表明,JRD模型适用于许多行业,改进的差分算法能够鲁棒地解决这一不确定性多项式难题。然而,现有的JRD模型更多假设了只有中央仓库可以多品种补货,而下游仓库每次补货是单品种备件^[52],这一假设显然不现实。文献

[53]所提出的多产品的联合补给与配送模型弥补了这一缺陷,且考虑了空间约束和重量约束。

根据库存检查方式的不同将常见的库存策略划分为 (Q,S) 、 (s,S) 、 (T,S) 和 (T,s,S) 四类, (Q,S) 和 (s,S) 属于连续检查策略下的补货策略, (T,S) 和 (T,s,S) 属于定期检查策略下的补货策略。这四类的库存策略对应的维修备件特点如表7所示。

表 7 库存策略匹配
Table 7 Inventory policy matching

库存策略	匹配备件说明
(Q,S)	连续库存检查、备件价值高、周转速度快、需要设置安全库存
(T,S)	定期库存检查、件价值适中或更低、周转速度适中或缓慢、可设置安全库存
(s,S)	连续库存检查、备件价值偏低、周转速度快、相对高价值需设置较高的安全库存
(T,s,S)	定期库存检查、备件价值偏低、周转速度慢

3.3.3 联合优化研究现状

针对多中心维修保障系统,还应考虑维修-库存、库存-选址、库存-选址-路径等联合优化模型。由于联合维修和备件库存优化能够同时解决维修计划和备件供应问题而受到越来越多的关注,然而以前这方面的研究多集中于一个单元系统上^[54-55],从全局角度看,这容易产生局部最优解,故多单元系统更符合实际需求。文献[56]针对多单元系统的联合维修及备件库存优化问题,根据库存级过渡关系,建立并优化了期望总成本模型。介于仓库选址、路径以及库存控制问题,次优化决策容易得到,但实际情况仍存在着仓库选址与需求点位置不恰当、物资的供应量与实际需求量不协调等问题,这并不利于整个库存系统运营优化^[57]。因此,对于多单元系统来说,如何选择合适的地点开设仓库,并制定最优的补货、配送库存方案,是决策者需要攻克的难题。现有的库存-选址^[58-59]和库存-选址-路径优化问题主要依据METRIC库存理论和JRP库存模型理论开展研究,然而库存-选址-路径联合优化的研究多针对单品种的维修备件^[60-62],缺少对多品种维修备件库存-选址-路径联合优化的研究。联合优化模型决策变量数量较多,其数学性质更为复杂,传统的智能算法容易出现不收敛或陷入局部最优等问题,这需要学者们对数学模型结构具有很深刻的认识,不断优化改进现有的算法。

4 未来发展方向

多中心装备维修保障资源配置决策理论与方

法尚处于快速发展的阶段,由于人员配置和备件供应保障过程仍受到许多不确定因素的影响,仍有许多地方需要在今后的研究中进行讨论:

1) 针对多中心维修保障系统资源配置的研究:从目前已有的文献来看,维修资源的配置研究多针对的是单个中心的资源配置问题,如单仓库的维修备件库存优化研究、单维修点的人员配置研究,这容易导致次优化问题。现有的维修资源管理调度仍然存在着配送任务繁重、仓库点位布局不合理、维修人员配置不平衡、维修备件库存与实际需求不适应等问题,这给后勤保障周转维修备件带来了极大的不便。因此,多中心系统的维修资源配置是研究者迫切需要解决的问题。

2) 基于不确定环境下装备维修保障资源配置的研究:实际的维修保障活动中,补货提前期容易受到运输条件、作战程度、天气情况、复杂地形等不确定因素的影响,而补货提前期的给定值与实际值的差异直接影响到维修备件的安全库存水平。已有的人员配置研究假设每个人的专业是固定的,而实际的维修人员的专业往往不是惟一的。另外,绝大部分的库存优化针对的是单库存和分布式库存系统,实际还存在着聚敛式、网络式等库存系统以及部分的越级直达供应或横向调拨供应模式。因此,优化模型中可以考虑更多的因素和任务剖面,使得模型更具有普适性、准确性。

3) 加强军事维修资源优化理论和民用优化理论结合维修资源配置的研究:这是一个综合性较强的应用研究工作,涉及了排队论、库存论、控制论、系统分析、智能优化算法、决策论、随机过程等学科知识。但目前我国的资源配置研究多集中于大型生产企业系统,部队装备维修保障资源优化的研究相对少些,这主要是因为我国军民融合发展理论研究深度不够。推动军民融合发展是顺应当今世界军事变革的重大举措,是实现富国和强军相统一的重要途径。

4) 基于智能化维修保障资源配置优化的研究:复杂系统维修资源优化的智能化无疑是当前和今后非常有潜力的发展方向,对提升维修资源配置的最终效果具有不可估量的作用。随着现代科技的不断发展和广泛应用,武器装备维修系统性能得到了大幅度的提升,如何利用大数据、人工智能等技术进行装备维修资源配置优化已经成为当前维修人员研究的热点。许多研究者止步于理论技术上,导致许多配置方法的应用率低,仅有少数的专家人员才能具体实施。因此,维修资源优化理论的智能化和软件化同样是今后研究的

重点。

5 结束语

装备维修保障资源配置优化是确保装备使用和维修的重要依托,加强资源配置优化是避免维修保障高耗低效的有效途径。本文重点对近年来国内维修保障资源配置优化理论和方法进行了研究。主要分析了多中心维修保障系统工作流程,并对维修人员配置优化和维修备件库存优化理论方法和研究现状进行了综述,对多中心维修保障系统资源配置优化进行了研究展望,为后续开展多中心系统资源配置优化研究奠定了基础。

参考文献:

- [1] 雷宁,曹继平,王连锋,等. 装备维修备件资源优化配置研究[J]. 飞航导弹, 2020(3): 84-87,96.
- [2] WANG Xinxin. Research on the division of internal responsibilities and the rationalization of personnel allocation in financial departments[J]. *Finance and market*, 2020, 5(4): 276.
- [3] CHEN Wenjie, GUO Hainan, TSUI K L. A new medical staff allocation via simulation optimization for an emergency department in Hong Kong[J]. *International journal of production research*, 2020, 58(19): 6004-6023.
- [4] WANG Kun. Research on application of FMECA in missile equipment maintenance decision[J]. *IOP conference series: materials science and engineering*, 2018, 317: 012037.
- [5] 石磊昊,陈军,叶振祺,等. 基于排队论的油料装备维修保障人员需求分析[J]. *指挥控制与仿真*, 2019, 41(1): 136-140.
SHI Leihao, CHEN Jun, YE Zhenqi, et al. Requirement analysis of POL equipment maintenance personnel based on queuing Theory[J]. *Command control & simulation*, 2019, 41(1): 136-140.
- [6] BANDI C, TRICHAKIS N, VAYANOS P. Robust multi-class queuing theory for wait time estimation in resource allocation systems[J]. *Management science*, 2019, 65(1): 152-187.
- [7] 谷玉波,贾云献. 基于维修任务的维修人员预测模型[J]. *火力与指挥控制*, 2013, 38(11): 107-110.
GU Yubo, JIA Yunxian. A study on maintenance task based maintenance manpower prediction Model[J]. *Fire control & command control*, 2013, 38(11): 107-110.
- [8] KIM S W, YOON B K. A study on the optimal allocation of maintenance personnel in the naval ship maintenance system[J]. *Journal of the Korea academia-industrial co-operation society*, 2015, 16(3): 1853-1862.

- [9] 张怀强, 卢远超, 王孟. 混合遗传算法的战时舰艇伴随保障人员优化配置[J]. *火力与指挥控制*, 2019, 44(4): 37–43.
ZHANG Huaiqiang, LU Yuanchao, WANG Meng. Optimal allocation of crew support in wartime ships based on hybrid genetic Algorithm[J]. *Fire control & command control*, 2019, 44(4): 37–43.
- [10] 余仁波, 徐廷学, 李田科. 飞航导弹使用与维修任务分析及保障资源的确定[J]. *飞航导弹*, 2011(2): 20–23.
- [11] 王雄伟, 陈春良, 曹艳华, 等. 基于维修任务的基本维修单元确定方法[J]. *装甲兵工程学院学报*, 2017, 31(2): 25–29.
WANG Xiongwei, CHEN Chunliang, CAO Yanhua, et al. Method of determining basic maintenance unit based on maintenance task[J]. *Journal of academy of armored force engineering*, 2017, 31(2): 25–29.
- [12] 伊洪冰, 张爱民, 宫丽. 基于最小维修单元的战时车辆装备维修力量需求测算[J]. *军事交通学院学报*, 2016, 18(2): 29–32.
YI Hongbing, ZHANG Aimin, GONG Li. Demand calculation of wartime vehicle equipment maintenance power based on minimum maintenance unit[J]. *Journal of military transportation university*, 2016, 18(2): 29–32.
- [13] 吴同哈, 陈春良, 丁苹, 等. 战时维修保障人员数量确定方法[J]. *装甲兵工程学院学报*, 2018, 32(5): 33–36.
WU Tonghan, CHEN Chunliang, DING Ping, et al. Method of determining quantity of wartime maintenance support Personnel[J]. *Journal of academy of armored force engineering*, 2018, 32(5): 33–36.
- [14] 吴同哈, 张仕新, 陈春良, 等. 基于能力需求的维修保障人员专业种类确定方法[J]. *兵工自动化*, 2018, 37(6): 73–77.
WU Tonghan, ZHANG Shixin, CHEN Chunliang, et al. Method of maintenance support staff specialties type determining based on requirement of ability[J]. *Ordnance industry automation*, 2018, 37(6): 73–77.
- [15] 李奇倚, 王磊. 基于决策树和模型树的作业工时估计方法[J]. *计算机集成制造系统*, 2018, 24(2): 309–320.
LI Qiyi, WANG Lei. Man-hour estimation method based on decision tree and model tree[J]. *Computer integrated manufacturing systems*, 2018, 24(2): 309–320.
- [16] WANG Tiening, YU Shuangshuang, LI Ning, et al. Coordinative allocation model and method of equipment maintenance materiel[C]//2016 Eighth International Conference on Advanced Computational Intelligence. Chiang Mai, Thailand, 2016: 29–35.
- [17] 孙笑, 宋卫星, 班利明, 等. 复杂人力资源约束下的抢占式维修工序调度[EB/OL]. *控制与决策*. (2021-01-06)[2021-05-17]. <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1250>.
SUN Xiao, SONG Weixing, BAN liming, et al. Preemptive maintenance scheduling under complex human resource constraints [EB/OL]. *Control and decision*. (2021-01-06)[2021-05-17]. <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1250>.
- [18] MA Zhiqiang, HE Zhengwen, WANG Nengmin, et al. A genetic algorithm for the proactive resource-constrained project scheduling problem with activity splitting[J]. *IEEE transactions on engineering management*, 2019, 66(3): 459–474.
- [19] 李岩, 陈云翔, 蔡忠义, 等. 战时军用飞机维修保障人员数量确定方法[EB/OL]. *火力与指挥控制*. (2020-09-27) [2021-06-02]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/14.1138.TJ.20200925.1042.020.html>.
LI Yan, CHEN Yunxiang, CAI Zhongyi, et al. Method for determining the number of maintenance and support personnel of military aircraft in wartime [EB/OL]. *Firepower and command and control*. (2020-09-27) [2021-06-02]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/14.1138.TJ.20200925.1042.020.html>.
- [20] 杨春辉, 张烁炜, 胡涛. 基于系统动力学的舰船装备维修保障体系演化仿真分析[J]. *中国舰船研究*, 2021, 16(3): 86–95.
YANG Chunhui, ZHANG Shuowei, HU Tao. Simulation analysis of warship equipment maintenance and support system evolution based on system dynamic[J]. *Chinese journal of ship research*, 2021, 16(3): 86–95.
- [21] 张宏远, 王志杰, 胡紫城, 等. 基于免疫算法的装备维修人员调配方法[J]. *兵工自动化*, 2019, 38(7): 72–77.
ZHANG Hongyuan, WANG Zhijie, HU Zicheng, et al. Deployment method of equipment maintenance personnel based on immune algorithm[J]. *Ordnance industry automation*, 2019, 38(7): 72–77.
- [22] 陈永龙, 王玉泉, 李世英. 使用保障资源的确定方法探讨[J]. *装甲兵工程学院学报*, 2003(3): 59–62.
CHEN Yonglong, WANG Yuquan, LI Shiyong. Research on establishment techniques for operational support resources[J]. *Journal of armored force engineering institute*, 2003(3): 59–62.
- [23] LOZANO S, DOBADO D, LARRAÑETA J, et al. Modified fuzzy C-means algorithm for cellular manufacturing[J]. *Fuzzy sets and systems*, 2002, 126(1): 23–32.
- [24] YIN Yong, YASUDA K. Similarity coefficient methods applied to the cell formation problem: a taxonomy and review[J]. *International journal of production economics*, 2006, 101(2): 329–352.
- [25] HUH W T, JANAKIRAMAN G. On the optimal policy structure in serial inventory systems with lost sales[J]. *Operations research*, 2010, 58(2): 486–491.
- [26] 吕瑞, 孙林夫. 面向产业链云服务平台的分布式备件库存协同控制方法与软件工具研究[J]. *计算机工程与科学*, 2017, 39(10): 1812–1818.

- LV Rui, SUN Linfu. Research on distributed spare parts inventory collaborative control method and software tool for industry chain cloud service platform[J]. *Computer engineering and science*, 2017, 39(10): 1812–1818.
- [27] 吕志彤, 宁兆宇, 皮湛恩. 基于网络的随船器材全可视化系统的研究[J]. *中国修船*, 2011(4): 44–46.
LYU Zhitong, NING Zhaoyu, PI Zhanen. Research on visualization system of ship equipment based on network[J]. *China ship repair*, 2011(4): 44–46.
- [28] 吕志彤, 皮湛恩, 宁兆宇. 基于射频技术的随船器材收发和消耗采集终端的研究[J]. *中国修船*, 2010(4): 29–31.
LYU Zhitong, PI Zhanen, NING Zhaoyu. Research on receiving, transmitting and consuming acquisition terminal of ship equipment based on RF technology[J]. *China ship repair*, 2010(4): 29–31.
- [29] JIANG Yuchen, SHI Cong, SHEN Siqian. Service level constrained inventory systems[J]. *Production and operations management*, 2019, 28(9): 2365–2389.
- [30] GU T, LI S, LI J, et al. Research on two-level inventory optimization algorithm for repairable spare parts based on improved differential evolution[C]//International Conference on Bio-Inspired Computing: Theories and Applications. Singapore, 2019: 341–354.
- [31] GU Tao, LI Sujian, KOU Zhenzhen, et al. Hybrid optimisation algorithm for solving the multi-level spare parts inventory optimisation problem[J]. *IET collaborative intelligent manufacturing*, 2020, 2(1): 14–21.
- [32] JIA Xinian, SHI Jiaming, WANG Gong, et al. Study on optimal inventory strategy for worn spare parts on the Chinese space station[C]//2016 11th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety. Hangzhou, China, 2016: 1–5.
- [33] CHEN Yukun, GAO Qi, SU Xiaobo, et al. Research on optimization of spare parts inventory policy considering maintenance priority[J]. *International journal of system assurance engineering and management*, 2018, 9(6): 1336–1345.
- [34] OZKAN E, VAN HOUTUM G J. Joint inventory and scheduling control in a repair facility [EB/OL]. SSRN electronic journal. (2021-02-11)[2021-05-17]. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3784144.
- [35] FENG Yunwen, TIAN Jing, XUE Xiaofeng, et al. Spare parts allocation of amphibious aircraft based on hybrid two-level repair[J]. *IOP conference series: materials science and engineering*, 2021, 1043(2): 022056.
- [36] LIU Weimiao, LIU Kanglin, DENG Tianhu. Modelling, analysis and improvement of an integrated chance-constrained model for level of repair analysis and spare parts supply control[J]. *International journal of production research*, 2020, 58(10): 3090–3109.
- [37] XIA Jun, FENG Yunwen, XUE Xiaofeng, et al. Multi-echelon inventory allocation of multi-indenture spare parts considering maintenance ratio[J]. *IOP conference series: materials science and engineering*, 2020, 715(1): 012047.
- [38] ZANG Yao, GAO Jindong, XING Zongyi, et al. Inventory management model of metro vehicle repairable spare parts based on METRIC[C]//2017 36th Chinese Control Conference. Dalian, China, 2017: 2956–2960.
- [39] SI Zexiang, ZHANG Tong, SUO Haokun. Efficient multi-level inventory optimization algorithm based on marginal analysis[C]//2020 IEEE 9th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference. Chongqing, China, 2020: 1068–1074.
- [40] LIU Yuchang, FENG Yunwen, XUE Xiaofeng, et al. Joint optimization of level of repair analysis and civil aircraft inventory system based on PSO algorithm[J]. *IOP conference series: materials science and engineering*, 2019, 538(1): 012061.
- [41] FUNG R Y K, MA X, LAU H C W. (T, S) policy for coordinated inventory replenishment systems under compound Poisson demands[J]. *Production planning & control*, 2001, 12(6): 575–583.
- [42] 张建荣, 于永利, 张柳, 等. 基于定周期策略的多品种维修器材联合订购模型[J]. *火力与指挥控制*, 2012, 37(9): 112–116.
ZHANG Jianrong, YU Yongli, ZHANG Liu, et al. Joint order model of multi-items maintenance spare parts based on periodic policy[J]. *Fire control & command control*, 2012, 37(9): 112–116.
- [43] WANG Yadong, SHI Quan. Improved dynamic PSO-based algorithm for critical spare parts supply optimization under (T, S) inventory policy[J]. *IEEE access*, 2019, 7: 153694–153709.
- [44] BALINTFY J L. On a basic class of multi-item inventory problems[J]. *Management science*, 1964, 10(2): 287–297.
- [45] LU Xiaobo, QU Changzheng, LV X, et al. Inventory decision model of unanimous ordering policy with multi-item maintenance materials[C]//2012 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering. Chengdu, China, 2012: 396–399.
- [46] 张建荣, 于永利, 张柳, 等. 维修器材联合订货的库存决策模型[J]. *系统工程与电子技术*, 2013, 35(1): 109–112.
ZHANG Jianrong, YU Yongli, ZHANG Liu, et al. Inventory decision model of joint ordering policy with maintenance materials[J]. *Systems engineering and electronics*, 2013, 35(1): 109–112.
- [47] LI Jiying, JI Zhihong. Joint replenishment problem of military aircraft consumptive items under resource con-

- straint[C]//2017 8th International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering. Prague, Czech Republic, 2017: 786–790.
- [48] MOON I K, CHA B C, LEE C U. The joint replenishment and freight consolidation of a warehouse in a supply chain[J]. *International journal of production economics*, 2011, 133(1): 344–350.
- [49] KASPI M, ROSENBLATT M J. On the economic ordering quantity for jointly replenished items[J]. *International journal of production research*, 1991, 29(1): 107–114.
- [50] WANG Lin, QU Hui, LI Yanhui, et al. Modeling and optimization of stochastic joint replenishment and delivery scheduling problem with uncertain costs[J]. *Discrete dynamics in nature and society*, 2013, 2013: 1–12.
- [51] ZENG Yurong, PENG Lu, ZHANG Jinlong, et al. An effective hybrid differential evolution algorithm incorporating simulated annealing for joint replenishment and delivery problem with trade credit[J]. *International journal of computational intelligence systems*, 2016, 9(6): 1001–1015.
- [52] LI Chengyan, WANG Chuang. Joint replenishment and delivery problem with stochastic demand[C]//2015 4th International Conference on Computer Science and Network Technology. Harbin, China, 2015: 121–123.
- [53] CARVAJAL J, CASTAÑO F, SARACHE W, et al. Heuristic approaches for a two-echelon constrained joint replenishment and delivery problem[J]. *International journal of production economics*, 2020, 220: 107420.
- [54] VAN HORENBEEK A, BURÉ J, CATTRYSSÉ D, et al. Joint maintenance and inventory optimization systems: a review[J]. *International journal of production economics*, 2013, 143(2): 499–508.
- [55] RAHIMI-GHAHROODI S, AL HANBALI A, VLIEGEN I M H, et al. Joint optimization of spare parts inventory and service engineers staffing with full backlogging[J]. *International journal of production economics*, 2019, 212: 39–50.
- [56] YAN Tao, LEI Yaguo, WANG Biao, et al. Joint maintenance and spare parts inventory optimization for multi-unit systems considering imperfect maintenance actions[J]. *Reliability engineering & system safety*, 2020, 202: 106994.
- [57] 张巍, 姜大立, 苏秋月. 战时军事物流调运网络选址配置与物资分配 [J]. *指挥与控制学报*, 2019, 5(2): 99–106.
- ZHANG Wei, JIANG Dali, SU Qiuyue. Site selection and distribution of wartime military logistics transportation networks[J]. *Journal of command and control*, 2019, 5(2): 99–106.
- [58] QU Hui, WANG Lin, LIU Rui. A contrastive study of the stochastic location-inventory problem with joint replenishment and independent replenishment[J]. *Expert systems with applications*, 2015, 42(4): 2061–2072.
- [59] RAOOFPANAH H, GHEZAVATI V. Extended hybrid tabu search and simulated annealing algorithm for location-inventory model with multiple products, multiple distribution centers and multiple capacity levels[J]. *Production engineering*, 2019, 13(6): 649–663.
- [60] HABIBI F, ASADI E, SADJADI S J. Developing a location-inventory-routing model using METRIC approach in inventory policy[J]. *Uncertain supply chain management*, 2017: 337–358.
- [61] SARAGIH N I, BAHAGIA S N, SUPRAYOGI, et al. A heuristic method for location-inventory-routing problem in a three-echelon supply chain system[J]. *Computers & industrial engineering*, 2019, 127: 875–886.
- [62] GUO Hao, LI Congdong, ZHANG Ying, et al. A nonlinear integer programming model for integrated location, inventory, and routing decisions in a closed-loop supply chain[J]. *Complexity*, 2018, 2018: 1–17.

作者简介:



齐小刚, 教授, 博士生导师, 西安电子科技大学智慧信息空间联合技术创新中心(西安)主任, 博士, 中国计算机学会高级会员、中国自动化学会高级会员、中国指挥控制学会高级会员、中国运筹学会理事、陕西省运筹学会常务理事。主要研究方向为复杂系统建模与数据处理、联合资源分配与系统仿真。主持完成国家自然科学基金项目、十三五预研项目、装备预研基金(重点项目)、陕西省自然科学基金重点项目等 30 余项, 获得军队和省部级科技进步二等奖 1 项、三等奖 2 项, 省级教学成果奖一等奖 2 项。发表学术论文 100 余篇。



方魁, 学士, 主要研究方向为装备保障, 参与大数据装备保障研究课题 1 项。



宋卫星, 工程师, 博士, 主要研究方向为装备维修保障优化和智能算法设计。主持并参与军内科研项目近 10 项, 获军队科技进步三等奖 3 项。