

doi: 10.7690/bgzd.2013.05.010

舰艇装备保障系统优化技术研究进展

包磊, 李庆民

(海军工程大学兵器工程系, 武汉 430033)

摘要: 对保障计划的决策问题与保障方案的优化问题进行了综述。分析了舰艇装备保障系统结构, 从解析计算模型、仿真优化技术等方面对系统优化的主要方法进行综述, 探讨了目前国内外解析优化技术和仿真优化技术的研究现状, 并对其存在的主要问题和将来的发展方向进行分析。

关键词: 装备保障; 库存优化; 系统仿真

中图分类号: TJ83 **文献标志码:** A

Research on Optimization Technology of Warship Equipment Support System

Bao Lei, Li Qingmin

(Department of Weaponry Engineering, Navy University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: Summarize the decision problem of support plan and optimization problem of support scheme. Analyze warship equipment support system structure, summarize system optimization method from resolution calculation model and simulation optimization technology. Discuss on domestic and foreign research of resolution optimization technology and simulation optimization technology. At last, analyze the main problem and development tendency.

Key words: equipment support; inventory control; system simulation

0 引言

目前我军舰艇装备保障活动的管理控制还处在“粗放式”的模式下, 保障方案的制订主要基于之前工作积累的经验, 在已有的保障方案上, 再根据所执行的任务情况进行修改。随着聚焦后勤、精确保障理念的提出, 装备保障资源库存大大下降、保障计划的制订更加精确, 方案计划的容错余地更小。为精确制订保障计划, 对保障计划的决策问题与保障方案的优化问题开展研究, 提供有效的保障计划辅助分析与优化手段是目前的研究热点; 因此, 笔者针对舰艇装备保障系统的优化技术, 对目前的研究进展和将来的发展方向进行分析。

1 舰艇装备保障系统结构

舰艇装备保障是一个物流供应与保障的问题, 其保障系统构成一个复杂网络, 包括地理上分布的多个实体以及若干运输路线, 各个实体承担不同的任务, 具有不同的交互关系, 系统规模大, 结构复杂, 属于复杂系统的范畴。从系统结构上看, 包括勤务船对编队的海上保障、前进保障点对勤务船的中继补给保障和本土战略物资储备到前进保障点(forward logistic base, FLB)的物流保障, 可抽象为图 1 所示的三级逻辑结构。

1) 勤务船对战斗群的保障(微观级战术保障)。

战斗群在海上展开后, 群内作战个体间的距离

可超过 25 n mail, 勤务船要在海上对整个战斗群进行供应保障, 如图 2 所示。勤务船采用不同的工作模式会产生不同的保障效果, 此层次保障系统的保障周期很短, 相应优化模型一般不以费用作为主要优化目标, 而是面向具体作战任务, 按小时为时间周期, 以任务成功率等指标作为主要优化目标, 从战术角度出发确定保障方案以及工作模式。

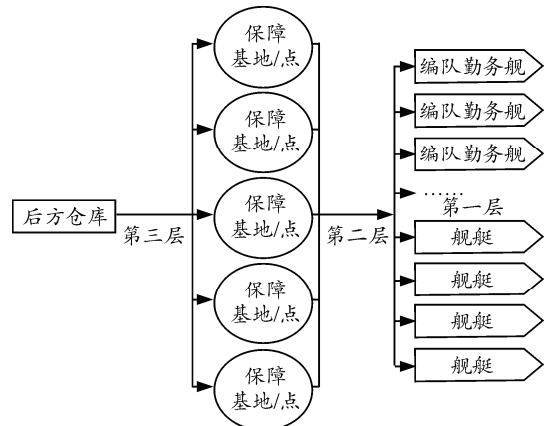


图 1 三级保障系统结构

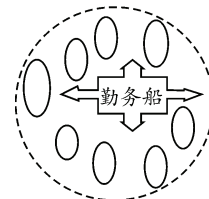


图 2 微观级保障

收稿日期: 2012-11-11; 修回日期: 2012-12-25

基金项目: 国家 863 创新基金(2010AAJ168); 湖北省自然科学基金(2011CDB053); 中国博士后基金资助项目(20100770027)

作者简介: 包磊(1977—), 男, 天津人, 博士, 副教授, 从事系统仿真、作战模拟研究。

2) 前进保障点对勤务船的保障(中继级保障系统)。

勤务船的资源耗尽后, 需要选择保障点进行补给。由于在海上的补给手段有限, 有舰艇会直接拖回保障点进行维修或补给, 存在越级直接保障的通路。此类保障系统的优化一般以装备可用度为主目标, 按天为任务保障周期, 以费用、运载能力等多目标制定保障策略(如图3)。

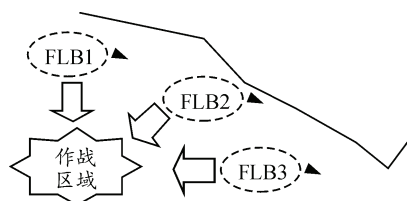


图3 保障点向编队勤务船的中继保障

3) 后方战略物资对前进保障点的补给。

最高层次的保障位于战略物资储备仓库与FLB之间, 该层次的保障系统考虑到FLB的物资消耗情况、后方运力情况, 根据地理情况, 对FLB进行物资配备与补给。此类保障系统的优化问题类似于供应链保障, 一般以年度为保障周期, 以费用为主要目标, 综合考虑缺货量与订购时间等因素确定保障供应网络的库存策略、订货渠道甚至生产计划。

针对舰艇装备保障系统中各级系统的优化问题, 目前主要有解析和仿真2类解决方法: ①解析方法主要是使用概率论、排队论、可靠性理论、运筹学、库存理论等理论方法, 计算保障系统中保障人员备件的最优配置策略; ②仿真方法通过建立装备保障系统的仿真模型, 对给出的保障方案进行仿真分析, 并对保障活动进行推演和评估。

2 解析优化技术研究

解析优化决策的主要内容为对备件、维修人员等保障资源进行优化配置, 并对保障活动计划进行控制, 其基本问题可以归结为决策模型与计划模型等一系列数学建模问题。

按研究侧重点不同, 相关的研究主要有资源需求预测模型、以需求量为中心的库存控制模型和以缺货量为中心的库存优化模型。

2.1 保障资源需求预测模型

需求预测模型根据资源消耗情况进行需求量的预测。根据预测原理, 相关模型有基于历史数据的时间序列预测方法、基于随机状态转移的需求预测方法和基于可靠性的需求量计算模型。

基于历史数据的时间序列预测方法根据历史数

据构成的时间序列, 采用指数平滑法、样条法或者灰色预测法等相关数学模型进行需求计算, 此类方法需要积累大量准确的历史数据, 并且数据的变化具有时间规律, 当缺乏历史数据的积累时, 方法应用存在较大局限性^[1-2]。

基于随机状态转移的需求预测方法认为由装备故障导致的保障资源需求是随机的, 因此其消耗过程是一个随机过程, 消耗量是个随机变量, 可采用Markov预测方法进行需求量预测。此类方法的局限性在于随着问题复杂程度的增大, 状态空间呈现组合式增长, 且在数据信息少的情况下很难确定故障率和维修率分布函数的相关参数^[3-7]。

基于可靠性的需求计算模型从装备可靠性模型出发, 建立数学模型计算资源需求量。文献[8-11]模型均是以保障率为约束条件给出的需求量计算模型, 其精确性和可用性依赖于相关装备可靠性模型。

2.2 基于EOQ的库存控制模型

经济订货批量模型(economic order quantity, EOQ)及其推广模型在需求与采购提前期确定、周期采购间隔相等的假设条件下, 综合考虑定货费用和存贮费用, 给出了采购量与采购时间的求解公式。相关推广模型一般将其中的一个或多个参数设为变量(为时变或是某参量的函数)来解决更广泛意义的库存问题^[12-16]。以EOQ理论为基础的库存模型考虑了库存控制的动态特性, 并在降低费用方面取得了成效。但EOQ模型围绕优化费用进行求解, 并没有建立与装备完好性或者装备可用度之间的关系, 难以确定备件缺货的取值。

2.3 基于缺货量的库存优化模型

以缺货量为中心的优化模型重点在于计算费用与装备完好性之间的关系。相关方法主要有METRIC模型以及相关推广模型^[17-18]。METRIC模型采用期望缺货值来描述完好率, 问题归结为在总费用约束下, 对所有不同库存点库存数量可能的排列组合分析计算相应的期望缺货值, 寻找约束下使装备使用效能最大的库存策略。基于METRIC的相关推广模型^[19-20]通过放宽METRIC模型中的假设来改进模型。此类模型都基于排队论的方法, 其前提为故障过程是一个泊松过程, 部件的数量无限, 且其故障失效率与工作件的数量无关。在装备数量较少的情况下, 上述假设会造成结果的不可信。

2.4 基于供应链的决策优化模型

相关的研究还有基于供应链的决策优化模型。按技术手段分类, 可分为排队论模型、对策论模型、

网络流模型和策略评价模型。排队论模型主要用于研究保障系统在平稳状态下的情况,并对资源分配进行优化;对策略模型主要研究系统供应网络中供应与制造之间、制造与使用之间的相互协调;网络流模型主要用于研究系统中各个成员的选择、布局以及协调问题;策略评价模型主要用于研究保障系统在不确定情况下的管理与协调^[21]。

总体上看,提出的模型都简化了应用背景,当模型面对实际问题时,往往由于计算复杂性和计算规模的限制使得模型的求解非常困难。例如美国数字设备公司(DEC)的重组案例中^[22], Amtzen 提出的多阶段多产品基于混合整数规划的全局供应链管理模型的目标函数包含 2 000~6 000 个约束条件,5 000~20 000 个变量。对于这样的巨型问题,只能采用松弛约束法、级联问题求解和行因素分解法以及约束分支例举法等方法才可求得近似优化方案。另外,这些模型往往忽视了相关随机因素的影响,由于缺少历史数据并且面临大量的不确定因素,常规的保障需求预测技术不能很好地解决装备保障问题,基于确定性前提的优化决策模型适应性明显降低,甚至不适用。

3 仿真优化技术

装备保障系统在形式上表现为由若干制造商、若干军用仓库和若干个保障点组成的分布式网状物流链,主要解决物资的存储和运输,并按任务需求完成给定的保障任务。其特点为整个供应链属于一个特定团体,处于供应网络上的各个实体完全共享资源,其生产与配送行为在接受上级实体直接领导的前提下享有一定的自主权。装备保障系统仿真设计的目的在于使用相关技术方法,建立保障网络的仿真模型,模拟保障系统的结构与保障活动的实施过程。

目前国外大多数装备保障仿真系统都能够以真实的作战需求为输入,对保障任务结果与任务需求进行仿真分析。美军的战术后勤配送仿真模型(tactical logistics and distribution systems, TLoaDS)是美国海军陆战队的配送后勤物资分析工具^[23],允许用户设置兵力、后勤配送网络等参数想定,生成相应的物资配送计划。美军的 LOGAM 模型^[24]是一个基于 HLA 标准的装备保障仿真模型,该模型用于对装备系统的寿命周期中的费用和效益进行分析和权衡。美海军开发的 BGLCAM(battle group logistics comparative analysis model)模型^[25]是低分辨率的统

计仿真模型,它确定了美国航母战斗群的三级保障体系,并可基于此保障模式对战斗群的作战补给供应进行仿真分析。瑞典 OPUS10/SIMLOX 系统可用于分析维修保障资源的可持续性并进行能力评估。

国内装备保障仿真技术还停留在仿真模型构造阶段。一般采用某些建模方法构建仿真模型并在 Extend 和 Arena 等仿真平台上仿真实现^[26-28]。所采用的建模方法通常为 IDEF 方法、Petri 网方法等等。由于 IDEF 法是一种结构化建模方法,因此设计结果与面向对象编程之间存在矛盾。基于 Petri 网的网络模型的基本思想是用库所集 P 代表系统中实体与活动的状态,用变迁集 T 代表系统中的事件。采用 Petri 网适合建立系统的动态模型,并能够对系统的动态特性进行分析,其图形表示也为其应用带来了很好的直观性,但是当系统比较复杂时, Petri 网模型会十分复杂并产生组合爆炸,给仿真带来困难。解决方法一般是对 Petri 网进行扩展,引入层次模型,人工智能技术等方法,降低网络的复杂度,提高其推理能力。还有一些学者引入了面向对象的建模方法,利用面向对象技术的分解、抽象以及递阶特性,可将复杂的离散事件系统分解为若干类对象,并将对象按照消息的传递关系连接起来。

仿真方法可用于分析整个装备保障系统,同时进行策略性的决策。由于不存在数学求解上的问题,因此适合对保障系统进行分析 and 评价。现有装备保障仿真模型多数以 Petri 网、IDEF 方法、UML 等形式体现,模型转化为程序乃至系统比较困难。由于装备系统保障资源种类繁多,不同资源数量值所组成的策略空间庞大,为了消除不确定性因素对保障策略还需要进行多次仿真,单纯采用仿真方法解决保障系统优化问题必须面对巨大的计算复杂性。现有模型在面临实际任务背景时,模型有可能会因为规模过大而无法实现。

4 结论

在实际工作中,舰艇装备保障系统受大量随机因素的影响,以离散事件系统为主的复杂连续-离散事件混合系统,其复杂性主要体现在贯穿于系统中的不确定性上,这些不确定性包括保障需求的不确定性、保障资源供应的外部不确定性、供需关系的不确定性、交纳时间的不确定性及保障活动执行情况的不确定性。解析优化方法通过对保障网络中的结构、流程进行数学建模,计算获得最优方案,解析方法的优势在于收敛速度快,可直接获得最优方

案。但由于存在多个 Np-hard 问题,针对复杂系统的解析求解非常困难,很难找到能描述一个复杂系统的数学模型,一般需要针对实际问题建立大量的假设与约束条件。仿真方法不需要严格的假设与约束条件就可以建立系统的精确模型,并具有对系统进行动态分析的能力,但由于装备系统保障资源种类繁多,不同资源数量值所组成的策略空间庞大,为了消除不确定性因素,还需要对保障策略进行多次仿真,单纯采用仿真方法解决保障系统优化问题必须面对巨大的计算复杂性。采用仿真与解析相结合的方法是比较有效的途径,即通过解析方法在解空间中快速获得备选方案集,再通过仿真方法进行进一步选优获得局部最优解来近似替代全局最优方案。

下一步需要着重研究的问题主要有:

1) 装备保障资源需求预测技术研究,由于资源需求是解析计算模型的主要输入,加之需求量容易受到不确定性因素的影响,需要着重对不确定性需求预测、间断性需求资源需求预测等问题进行研究;

2) 面向任务的装备保障系统战术模型研究,面向具体作战任务,以任务成功率为目标的保障效能模型;

3) 解析与仿真方法相结合的优化决策框架研究,通过解析模型快速生成备选保障方案集,通过仿真方法进一步选优,从而综合生成备选最优方案。

参考文献:

- [1] 毕义明,王汉功. 武器装备损耗备件预测模型研究[J]. 装备指挥技术学院学报, 2004, 15(1): 1-4.
- [2] 徐晓燕. 一种基于需求特性分类的备件库存管理方法及其实证研究[J]. 系统工程理论与实践, 2006(2): 62-67.
- [3] 唐铭. 航材备件影响因素及库存控制[D]. 中国民用航空学院硕士学位论文, 2003.
- [4] 朱一飞,黄国策. 备件储备量的马尔可夫决策模型研究[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2001, 2(2): 91-94.
- [5] 马保国,贺步杰,高双峰. 低消耗器材的马尔可夫预测模型[J]. 系统工程理论与实践, 1999(5): 93-95.
- [6] Treharne J T, Sox C R. Adaptive inventory control for non-stationary demand and partial information[J]. Management Science, 2002, 48(5): 607-624.
- [7] Lovejoy W S. Stopped myopic policies in some inventory models with generalized demand processes[J]. Management Science, 1992, 38(5): 688-707.
- [8] 伏洪勇,赵宇. 一种航空设备备件预测模型的风险评价[J]. 系统工程与电子技术, 2003, 25(12): 1576-1578.
- [9] 牟讴红. 某型机备件需求确定过程和方法的研究[D]. 北京航空航天大学硕士学位论文, 2000.
- [10] 姜柏松. 航材库存需求预测与优化[D]. 中国民用航空学院硕士学位论文, 2004.
- [11] 鲍敬源,王航宇. 装备维修中备件需求率的预计方法[J]. 海军工程大学学报, 2003, 15(2): 101-103.
- [12] Pan J C H, Hsiao Y C. Integrated inventory models with controllable lead time and backorder discount considerations[J]. International Journal of Production Economics, 2005(93~94): 387-397.
- [13] 陈晖,罗兵,张仁萍. 提前期、构建成本和短缺量滞后供给率均可控的EOQ模型[J]. 系统工程, 2007, 25(10): 82-87.
- [14] Kulkarni V G, Yan K. EOQ analysis under stochastic production and demand rates[R]. Technical report UNC/STOR/05/09. Submitted to Stochastic Models, 2005.
- [15] Zanoni Simone, Ferretti Ivan, Zavanella Lucio. Multi-echelon on spare parts inventory optimization: a simulative study[C]. Proceedings 19th European Conference on Modelling and Simulation, 2005.
- [16] Liu Liming, Liu Xiaoming, Yao David D. Analysis and optimization of a multistage inventory queue system[J]. Management science, 2004, 50(3).
- [17] Sherbrooke C C. METRIC: A multi-echelon technique for recoverable item control[J]. Operations Research, 1968, 16(2): 122-141.
- [18] Diaz A, Fu M C. Models for multi-echelon repairable item inventory systems with limited repair capacity[J]. European Journal of Operational Research, 1997(97): 480-492.
- [19] H C Lau, H Song. Two-echelon repairable item inventory system with limited repair capacity under nonstationary demands[C]. Proc.35th Meeting of the Decision Sciences Institute(DSI), 2004.
- [20] H C Lau, H Song, C T See, S Y Cheng. Evaluation of time-varying availability in multi-echelon spare parts systems with passivation[J]. European Operational Research, 2006, 170(1): 91-105.
- [21] 陈剑,蔡连侨. 供应链建模与优化[J]. 系统工程理论与实践, 2001, 6.
- [22] Bruce C. Arntzen, Gerald G. Brown. Global Supply Chain Management at Digital Equipment Corporation. Interfaces. 1995, 25: 69-93.
- [23] David J. Parson, Krause L.C.. Tactical Logistics and Distribution Systems Simulation[J]. Proceeding of the Winter Simulation Conference Interfaces. 1999.
- [24] Saku Hieta. Supply Chain Simulation with Logsim-Simulator[J]. Proceeding of the Winter Simulation Conference Interfaces. 1998.
- [25] Gary L. Morris. Battle Group Ordnance and Fuel Logistic Task Measures of Performance for the Universal Naval Task List[D]. Naval Postgraduate School Thesis. 1999.
- [26] 陈春良,王岩磊,孙盛坤. HTCPN 在装备保障业务流程建模与优化中的应用[J]. 系统仿真学报, 2008(20), 10.
- [27] 宋光明,王胜德,宋建社. 基于TCPN的装备维修保障资源管理模型[J]. 系统仿真学报, 2007(19), 1.
- [28] 宋坤. 基于Petri网的装备保障系统建模与仿真技术研究[D]. 国防科学技术大学研究生院, 2008, 11.