

装备维修任务调度理论与策略研究现状综述

刘彦¹, 陈春良¹, 王生凤², 陈伟龙¹, 张立君¹

(1. 陆军装甲兵学院 装备保障与再制造系, 北京 100072; 2. 陆军装甲兵学院 科研学术处, 北京 100072)

摘要: 在明确装备维修任务调度需求及意义的基础上, 分析了装备维修任务调度理论及策略的研究现状; 在维修任务调度理论方面, 根据调度的特点对抢占调度与非抢占调度、静态调度与动态调度进行了阐述; 在维修任务调度策略方面, 根据调度目标及调度特点对时钟驱动调度策略、优先级调度策略以及其他调度策略进行了阐述; 在分析研究现状的基础上, 提出应对装备维修任务抢占调度及混合调度策略等方面加强研究。

关键词: 装备维修; 任务调度; 调度理论; 调度策略; 综述

Review of Research Status of Equipment Maintenance Task Scheduling

Liu Yan¹, Chen Chunliang¹, Wang Shengfeng², Chen Weilong¹, Zhang Lijun¹

(1. Department of Equipment Support and Remanufacturing, Academy of Army Armored Force, Beijing 100072, China;

2. Office of Academic and Scientific Research, Academy of Army Armored Force, Beijing 100072, China)

Abstract: Based on confirming the demand and significance of equipment maintenance task scheduling, research status of equipment maintenance task scheduling theory and strategy is analyzed; in the maintenance task scheduling theory aspect, preemption scheduling, non-preemption scheduling, static scheduling and dynamic scheduling are analyzed according by scheduling characteristic; in the maintenance task scheduling strategy aspect, clock drive scheduling strategy, priority scheduling strategy and other scheduling strategy are analyzed according by scheduling target and characteristic. It is put forward that equipment maintenance task preemption scheduling and hybrid strategy should be further researched based on results from analysis of current research status.

Keywords: equipment maintenance; task scheduling; scheduling theory; scheduling strategy; review

0 引言

随着现代战争的不断演化以及高新技术的深入发展, 战争形态逐步向信息化战争转变, 战场空间多维一体, 战场环境瞬息万变, 战争的突然性、机动性和速决性更为突出, 部队机动能力和精确打击能力得到大幅提升, 作战节奏快, 作战进程短, 呈现出全纵深的保障态势, 使得战时保障任务更加繁重, 战时装备维修保障时间更加紧迫, 对战时装备维修保障的时效性提出了更高要求。如何在有限的维修时间、维修资源、维修能力约束下合理高效安排维修任务, 使得待修装备能得到尽快修复并归建作战部队逐渐成为战时装备维修保障的核心问题。

日益成熟的测试与控制技术在提高战场故障诊断及维修性的同时也为装备维修任务调度提供了可能。装备维修任务调度旨在根据诸多相关约束, 合理安排规划维修资源及维修任务, 以实现维修任务调度目标, 对提高维修效率, 保证作战任务的顺利完成具有重要意义。

1 维修任务调度研究前提

高新技术的引入在提升陆军部队战斗力、提高战时装备保障要求的同时还带来了新特点: 一是实现了新型陆军装备互联、互通、互操作, 在便于作战指挥的同时使得装备信息能够及时传递; 二是实现了装备在战场的精确定位, 在便于作战行

动协调的同时也便于战损装备的定位; 三是先进的故障诊断设备及故障诊断技术实现了战时战损装备故障信息实时快速地获取; 四是新型陆军部队强大的信息网络使得维修保障信息能及时高效传达。这一系列的特点为战时合理高效安排维修任务提供了可能。

装备维修任务的合理调度需要建立在准确地故障装备信息基础上, 而装备的故障信息地精确获取依赖于先进的故障诊断技术, 先进的测试与故障诊断技术能够对战时战损装备进行故障定位以及故障程度分析, 从而实现故障信息实时快速地获取, 为装备维修任务调度提供输入数据及基本支撑。因此下面将综述现阶段故障诊断技术的发展现状, 用以探讨装备维修任务调度研究的前提。目前, 故障诊断技术在装备维修领域得到极大的运用, 总体来说故障诊断技术可以分为以下几类:

1.1 基于解析模型的方法

基于解析模型的故障诊断方法是通过建立科学的数学模型, 由模型的变化判断装备的工作状态^[1], 代表性的有参数估计法、状态估计法、等价空间法、代数观测器法等。

其中, 参数估计法是指针对故障参数的显著变化, 通过已有参数估计方法获取故障信息, 从而实现故障诊断^[2]; 状态估计法包括观测器法、Kalman 滤波法和自适应滤波法等, 通过重构被诊断过程的状态, 构成包含各种故障信息的残差序列, 从而构造相应模型在统计检验的基础上得到故障信息^[3]。等价空间诊断法主要运用于线性系统, 通过输入输出实际测量值检验模型的等价性, 从而检测和分离故障^[4]。

1.2 基于信号处理的方法

对于难以建立精确模型的待诊断装备或对象, 可以根据输入输出信号, 利用信号模型直接分析可测信号, 从中提取特征

收稿日期: 2018-01-08; 修回日期: 2018-01-25。

作者简介: 刘彦(1994-), 男, 江西吉安人, 博士研究生, 主要从事装备保障系统运行与优化方向的研究。

陈春良(1963-), 男, 河北容城人, 教授, 博士研究生导师, 主要从事装备保障与运用方向的研究。

值,从而诊断出故障。常用的有直接测量法、输出信号处理法、小波变换法、信息融合法等,随着故障诊断技术的进一步深入,等价空间法、界限检测与经验推理结合法、辅助信号检测法、主成分分析法等一系列方法不断被提出与改善^[5]。

基于信号处理的故障诊断方法能较有效规避系统建模的难点,对输入输出信号处理能实现简单、实时,但是故障的定位及辨识精度有待加强,需要与其他故障诊断技术结合使用。

1.3 基于人工智能的方法

针对既不能建立精确模型又难以有效分析输入输出信号的待诊断装备,可以采取基于人工智能的故障诊断方法,常用的包括:案例分析法、神经网络法、模糊数学法、蒙特卡洛法、遗传算法、数据挖掘法等。

其中,案例分析法通过对比分析相似问题的诊断结果进行改善和修正;神经网络法通过训练神经元,利用其自学习和并行计算能力从模式识别的角度实现故障的诊断,具有良好的自适应性,但是需要足够的学习样本,多用于稳态特征参数的提取^[6];模糊数学法能够较好克服特征信号的测量阈值难定义的问题,通过隶属关系及模糊关系矩阵实现不确定关系的刻画,进而实现故障诊断。

基于人工智能的故障诊断方法能充分利用智能算法求解复杂问题,有较大的发展前景,需要在后续研究中解决历史数据依赖性等问题,以提升方法的诊断精度。

总得来说,装备维修任务调度建立在以故障诊断技术为主的一系列技术和方法的基础上,合理精确的故障诊断技术以及高效迅速的指挥控制网络是装备维修任务调度的前提,也是开展战时装备维修保障的必要条件。

2 维修任务调度理论研究现状

调度是指在适当的时刻运用适当的方法为适当的用户分配适当的资源,以使系统高效运行,达到特定的目的。调度问题自提出以来迅速得到广泛运用和深入的研究,解决了许多工程实际问题,如车间调度问题、列车调度、物流配送问题等,提高了生产效率,节约了生产成本。调度问题在军事领域也得到广泛运用,如无人任务调度^[7]、卫星侦察调度^[8]、备件供应^[9]等。而随着组合优化思路在工程运用中的深入,调度问题在军事领域的研究也不断得到重视。本文中装备维修任务调度指的是在战时装备维修保障过程中,根据维修保障资源、维修任务需求以及战场态势,对维修任务进行合理调度,以达到优化目的。

调度问题(Scheduling Problem)根据调度对象的不同可以分为任务调度和作业调度。作业是指为完成生产或调度而执行的基本活动,而任务是指一组共同提供相关功能的作业组合^[10],简而言之,任务是由一系列作业组成,任务是一系列作业的统称,如装备维修任务可以分为行动部分修理、火力部分修理以及通信部分修理等修理作业。在本文中,具体的修理作业是维修任务的细化,因此将修理作业的调度也划归为维修任务调度。

2.1 抢占调度与非抢占调度

调度问题根据任务执行过程中是否允许中断任务可以分为抢占调度与非抢占调度^[11],抢占调度是指在任务执行过程中,当前执行的任务可以被更加重要或更加紧迫的任务中断,相应的资源被抢占,当抢占任务完成后继续执行被抢占任务^[12],

简而言之就是任何时刻,高优先级任务可以抢占低优先级任务^[13]。抢占调度的优点是调度灵活,能够较好处理突发任务,但是容易导致资源待机时间长,特别是对于资源需要转场的任务,容易导致资源待机时间增多,不利于全局的调度最优化。非抢占调度^[14]是指在任务执行过程中,任务开始执行后就不能被中断,无论其他任务有多重要或紧急,都必须等当前执行的任务完成并释放资源后方能执行。非抢占调度的优点是避免了任务间转换的时间消耗,但是与抢占调度比较而言,调度不够灵活,缺乏对突发任务的考虑。针对抢占调度及非抢占调度问题,随着对调度问题研究的深入,近年来有学者提出了限制抢占调度问题^[15],限制抢占调度介于抢占调度及非抢占调度之间,认为当新任务满足一定条件才能进行任务抢占,否则是非抢占任务调度。通过设置抢占阈值调度^[16]及延迟抢占调度^[17]用以描述抢占限制条件,前者通过在任务执行过程中不断提升被执行任务的优先级来减少其他任务的抢占;而后者通过设置不可抢占区,在不可抢占区内任务不能被抢占,任务抢占只能发生在不可抢占区结束之后。广义上来讲,限制抢占调度问题其实是抢占调度的一种更为普遍适用的情况,在很多时候将限制抢占调度归为抢占调度的一类。

国外方面,Levi等^[18]以最小化维修费用为目标,针对空军飞机模块化系统的维修任务调度问题,构造了相应的非抢占调度模型及算法,实现了维修任务的调度。Safari等^[19]考虑到等待时间、维修费用等因素,针对流水车间机器维修任务调度问题提出了多目标函数动态抢占调度的思想。Davis^[20]针对多处理器实时系统调度问题,设计了延迟抢占调度算法,通过计算任务的最小不可抢占区,提高实时系统的可调度性。Wang, Baruah以及Burns针对抢占任务调度问题分别提出了抢占阈值调度算法^[21]、延迟抢占调度算法^[22]以及固定抢占点调度算法^[23]。

国内方面,姚双印等^[24]将军械装备的维修任务调度问题转化为非抢占式调度车间任务调度问题,并引入细菌觅食优化算法(Bacteria Foraging Optimization Algorithm, BFOA)进行模型求解,通过Matlab仿真验证了模型有效性。王浩等^[25]通过在待修装备队列中不断添加待修装备的方法进行维修任务调度,并设计了蜂群算法进行了模型求解,但其在维修任务调度过程中,当前一个维修任务结束才对新的维修任务进行添加,仍然属于非抢占调度。崔嘉等考虑到航空定检修理工作涉及多车间、多工种、多工序的问题,对BFOA算法进行了改进,对非抢占式维修任务工序进行了调度优化,提高了全局寻优能力^[26]。

对于维修任务调度问题,目前国内外的研究大多将其视为非抢占调度,认为在维修任务执行过程中不能中断,然而战时由于任务的突发性和紧急性,维修任务抢占的情况有时更加贴近现实,也更具有研究意义,目前关于维修任务的抢占调度问题缺乏深入的研究。

2.2 静态调度与动态调度

调度问题根据任务分配的方式可以分为静态调度^[27]和动态调度^[28]。静态调度是指在进行任务调度时,所有的任务队列中任务的执行顺序是确定的,不会随着任务需求或资源约束等外在条件而变化。静态调度的优点是可预测性强、调度过程简单,适合于任务需求确定的调度问题,但是调度的灵活性相对较差,对于任务需求、任务执行过程以及调度过程中的不确

定性问题难以适用,难以实现全局最优。动态调度是指在任务执行阶段会根据任务需求及相关约束确定下一个执行的任务顺序,任务队列中的任务执行顺序并非一成不变,而是不断进行动态调整^[29]。动态调度较为灵活,能够根据不断出现的任务需求和不断变化的资源约束实时调整调度顺序,因此在工程实际中得到广泛运用。

国外方面, Yeung 等^[30]从供应链的角度出发对生产—销售两阶段静态调度问题进行了研究,提出了排序优化算法。Phanden 等^[31]提出了遗传算法求解车间作业静态调度问题, Rojas^[32]、Nasir^[33]、Li^[34]、Korykowski^[35]针对静态调度问题,分别提出了模拟退火算法、禁忌搜索算法、粒子群算法以及蚁群算法。Jackson^[36]最早提出静态调度与动态调度的概念, Szelde、Nof 等在此基础上对动态调度问题进行了扩展,提出了动态调度中的反馈调度^[37]、自适应调度^[38]、实时调度^[39]以及在线调度^[40]概念。随着动态调度问题的不断发展,一些新的动态调度方法推陈出新,多智能体^[41]、模糊理论^[42]、人工智能技术^[43]等逐渐引入到动态调度问题的研究中。

国内方面,杨晶等^[44]针对维修任务已知的静态调度问题,以备选分配方案中总维修跨度时间最短为目标,构建了基于遗传算法的维修任务调度模型,并通过 Extend 软件进行仿真验证。杜家兴等^[45]分别从底盘维修和上装维修出发,将排队论引入到装甲装备维修任务调度中,解决了维修任务静态调度中任务需求与修理能力的最优匹配问题。陈盖凯等^[46]运用 TOP-SIS 法确定维修任务优先级,结合 PSO 算法构造了应急模式下飞机的维修任务调度模型。陈立云等^[47]针对多维修任务、多维修需求点以及多维修保障单元的动态维修任务调度问题,设计了可基于滚动时域的触发规则,运用遗传算法构建了动态调度模型并通过仿真验证其合理性。王正元、朱昱等^[48]以最短时间恢复作战单元战斗力为目标函数,以维修任务静态调度模型为基础,将维修任务动态调度转化为随任务变化反复进行维修任务静态调度,实现了维修任务的动态调度。

总的来说,对于维修任务的静态调度,可以将每一次任务执行前的决策看作任务分配,进而抽象为指派问题进行建模与求解。由于维修任务需求的动态性,目前维修任务调度的研究多以动态调度为主,但是涉及的约束条件较为简单和理想化,有待于根据战场情况合理抽象约束条件,对维修任务调度模型进行深入研究。

3 维修任务调度策略研究现状

维修任务调度策略是维修任务调度的关键,最常见的维修任务调度策略包括:时钟驱动调度策略^[49]和优先级调度策略。

3.1 时钟驱动调度策略与优先级调度策略

时钟驱动调度策略是指在维修任务开始执行后,选择一个固定的时刻,当该时刻到达时对维修任务进行重调度,并决定任务的执行顺序。这个固定的时间是在维修任务开始调度之前就确定的,时钟驱动调度策略的优点是避免每次新的维修任务出现就进行重调度,能提高调度的稳定性,但是难以处理突发任务或紧急任务对维修任务调度的影响。

优先级调度策略是指在调度前对每一个维修任务赋予一个优先级,当多个维修任务需要分配给维修力量时,根据维修任务的优先级高低执行任务,优先执行优先级高的任务。优先级调度策略的优点是能够较好地解决任务分配中重要任务先执行

原则,缺点是每当新任务出现,所有未完成任务的相对优先级关系就需要重新计算,进而必须进行重调度,调度较为频繁。

优先级调度策略是事件驱动,而时钟驱动调度策略是时钟驱动,两者有本质的区别。对于维修任务调度,时钟驱动调度策略容易导致当前维修任务还未完成而时钟驱动触发,维修力量中断当前任务转而执行其他任务,一方面与战时装备维修实际不符,另一方面无形中增加了维修力量转场时间。相对而言,优先级调度策略在维修任务调度中运用更为广泛,并逐渐演化出固定优先级调度^[50-51]与动态优先级调度^[52-53]。

固定优先级调度是指在调度过程中每个任务的优先级是固定的,不会随着新任务需求的出现或其他约束而改变,固定优先级调度本质上是静态调度的问题。固定优先级调度的优点可预测性强、调度过程简单,缺点是调度灵活性差,不能及时反映任务调度过程中的不确定性因素。

动态优先级调度是指在调度过程在每个任务的优先级是动态变化的,会随着新任务需求的出现或其他约束而改变,动态优先级调度本质上是动态调度的问题。动态优先级调度优点是调度灵活,能够较好地处理任务调度中的不确定性,更贴近任务调度的实际情况,但缺点是调度模型求解困难,对算法要求高。

国外方面, Nakamurad 等^[54]于 1987 年提出任务优先级概念。Chanbari 等^[55]将任务优先级调度引入到云计算调度中。Liu 等^[56]在 Min—Min 算法中引入动态优先级,避免了资源负载失衡的问题。Li 等^[57]通过将优先级进行分组,避免了任务优先级差异巨大的问题。

国内方面,檀明等^[58]以任务集整体抖动最小化为目标,设计了面向抖动优化的任务静态优先级调度模型。彭浩等^[59]针对实时任务响应系统,以计算任务响应时间为出发点,提出了静态优先级实时任务的多项式时间近似分析方法。彭浩等提出了延迟抢占分区模型,设计了固定优先级调度策略,明显减少了任务抢占次数^[60]。刘亚秋等^[61]针对任务优先级调度在云环境下负载失衡的问题,引入萤火虫算法,用任务价值密度与任务执行紧迫性来表征动态优先级,提出了基于优先级和萤火虫行为的任务调度模型。丛龙水^[62]以作业调度三种基本算法为基础,设计了动态优先级作业调度综合算法,兼顾了三种基本算法的优点,但是没有考虑如何规避三种算法的缺点。李锴等^[63]针对静态优先级在多维动态列表调度中的不足,将任务需求资源的变化映射到任务优先级的动态变化,提出了动态优先级算法,并以联合作战战役算例对算法进行了验证。

由战时装备维修任务及其维修任务调度的特点可知,战时装备维修任务调度采取优先级调度策略或者以优先级调度策略为主进行调度更为贴近战场实际,而任务优先级的确定是进行优先级调度的基础。维修任务优先级反映的是各维修任务的相对重要程度,其决定因素包括装备类型、装备损伤程度、装备对战斗的重要程度,装备与维修力量之间的距离等,求解维修任务优先级的实质是对维修任务的重要程度进行排序,属于典型的多属性决策问题^[64]。

3.2 其他维修任务调度策略

3.2.1 任务驱动策略

1) 先到先服务 (First Come First Sever, FCFS) 策略:按照任务到达的先后次序,优先执行先到达的任务^[65]。

2) 后到先服务 (Last Come First Sever, LCFS) 策略:按

照任务到达的先后次序,优先执行后到达的任务^[66]。

3) 最短平均处理时间 (Shortest Mean Process Time, SMPT) 策略^[67]: 根据任务的平均处理时间,优先执行平均处理时间最短的任务,即优先处理容易完成的任务。

4) 最长平均处理时间 (Longest Mean Process Time, LMPT) 策略^[68]: 根据任务的平均处理时间,优先执行平均处理时间最长的任务,即优先处理最难完成的任务。

5) 预测最早完工时间 (Estimated Earliest Time to Complete, EETOC) 策略^[69]: 该策略结合先到先服务与最短平均处理时间两种策略,通过预测任务的完工时间(任务到达时间与任务平均处理时间之和),优先执行预测完工时间最短的任务。

6) 预测最迟完工时间 (Estimated Latest Time to Complete, ELTOC) 策略^[69]: 该策略与预测最早完工时间策略刚好相反,优先执行预测完工时间最长的任务。

7) 改进优先级联合策略^[70]: 该策略将 FCFS、LCFS、SMPT 等策略进行结合及改进,使之更符合实际应用,衍生出改进的先到先服务 (Modified First Come First Sever, MFCFS) 策略、改进的后到先服务 (Modified Last Come First Sever, MLCFS) 策略、改进的最短平均处理时间 (Modified Shortest Mean Process Time, MSMPT) 策略、改进的最长平均处理时间 (Modified Longest Mean Process Time, MLMPT) 策略、改进的预测最早完工时间 (Modified Estimated Earliest Time to Complete, MEETOC) 策略、改进的预测最迟完工时间 (Modified Estimated Latest Time to Complete, MELTOC) 策略。

3.2.2 维修力量驱动策略

1) 最近修理 (Nearest Dispatch, ND) 策略^[71]: 按照故障装备的位置,优先安排维修力量执行距离维修力量最近的维修任务。

2) 预测性修理 (Anticipatory Dispatch, AD) 策略^[71-72]: 根据已出现的故障装备预测近期可能出现的故障装备,以修理组到两者的总时间最小安排维修力量执行任务。

3.2.3 维修资源驱动策略

1) 最小累积资源需求 (Minimum Cumulated Resource Demand, MINCRD) 策略^[73]: 根据维修任务的累积资源消耗,优先执行累积资源最小的任务。

2) 最大累积资源需求 (Maximum Cumulated Resource Demand, MAXCRD) 策略^[73]: 根据维修任务的累积资源消耗,优先执行累积资源最大的任务。

3) 先到先服务与最小资源需求混合 (First Come First Sever & Minimum Cumulated Resource Demand, FCFS & MINCRD) 策略^[74-75]: 同时考虑任务到达时间和完成任务的资源消耗,优先执行先到达、所需资源少的任务。

4) 先到后服务与最大资源需求混合 (Last Come First Sever & Maximum Cumulated Resource Demand, LCFS & MAXCRD) 策略^[74-75]: 同时考虑任务到达时间和完成任务的资源消耗,优先执行后到达、所需资源多的任务。

近年来,国内外针对维修任务调度及调度策略进行了一定研究, Lee、Hsu 等^[76-77]以优先级策略为主,考虑多种调度目标,构建了多目标调度任务调度算法。吕学志等从伴随修理^[67]、巡回修理^[70]以及定点修理^[75]三个方面出发研究了装备

维修任务调度的调度策略。朱昱等^[78-79]以最大保障时间为目标,对战时装备维修任务的静态调度和动态调度问题进行了研究,并给出了相应的维修任务调度模型,使装备维修效益最大。吕学志等^[80]考虑到维修人员、设备的休息问题,给出了维修人员、设备休息前提下的维修任务调度模型,并运用粒子群算法求解了这一混合整数规划模型。王正元等^[81]以尽快恢复作战单元战斗力为目标,以改进的最短平均处理时间策略为调度策略,建立考虑专业的维修任务静态调度模型及动态调度模型,通过反复调用,实现战场抢修的动态调度。朱昱等^[82]以维修任务优先级为调度策略,考虑维修流程,构建了考虑装备维修流程的多维修任务调度模型。万明等^[83]分别以最大保障时间和维修小组负载均衡为调度目标,采取优先级调度策略,分别设计了一种新算法。孙志刚等^[84]采用优先级调度策略,针对多专业流水式批量维修任务调度问题构建了考虑权重的维修任务调度模型,并通过实验验证了该方法的有效性。

总的来说,维修任务调度策略的研究在不断发展,其中以优先级调度策略的应用最为广泛,多种调度策略的综合运用是维修任务调度研究的趋势。然而维修任务调度策略的选择更重要的是以维修任务的实际情况为基础,调度策略要服务于调度目标,应该在明确调度目标的前提下合理选取调度策略,使得调度结果实现调度目标的最优化。

4 研究展望

综上所述,目前装备维修任务调度的研究得到了较高的关注,相应的研究工作也促进了维修任务调度的发展,目前关于维修任务调度理论、维修任务调度策略等方面取得了一定的进展,但也存在着一定的问题,在许多方面还有待进一步的研究,主要体现在以下三个方面:

1) 故障诊断技术作为维修任务调度的前提,为维修任务调度提供了调度目标的相关故障信息,由于战时战场环境的限制,远程故障诊断技术将是现阶段战时装备故障诊断的迫切所需,而混合故障诊断技术是实现故障诊断精确化、及时化的主流发展趋势,应该加大故障诊断技术在多学科、多层次的全局发展,紧贴战时故障诊断快速、及时等需求,为后续维修任务调度提供科学合理支撑。

2) 目前关于维修任务调度的研究大多将其视为非抢占调度,认为在维修任务执行过程中不能中断。然而战时战场态势瞬息万变,待修装备重要程度、任务紧急程度等因素交错复杂,仅考虑维修任务的非抢占调度缺乏了对任务突发性及紧急性的考虑,容易导致维修任务调度不合理、维修资源利用不充分等情况。因此,针对装备维修任务调度问题,在贴近战场实际的基础上,根据调度目标深入对维修任务的抢占调度进行研究是合理调度维修任务的有效途径。

3) 维修任务调度策略作为维修任务调度的核心,是开展维修任务调度的基础。目前维修任务调度多以静态优先级调度策略为主,忽略了待修装备维修优先级会随着战斗阶段的改变等因素动态变化的问题。应该在定量分析维修任务动态优先级的基础上,根据修理方式及调度目标将维修任务动态优先级调度策略与其它调度策略相结合,以实现调度目标的最优化。

参考文献:

- [1] 王飞漩,魏清新,王坤明. 武器装备系统级故障诊断发展及研究[J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (4): 977-979.

- [2] 周青龙. 故障诊断与监控 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 1992.
- [3] 李海军, 马登武, 刘 霄, 等. 贝叶斯网络理论在装备故障诊断中的应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [4] 蒋燕妮, 陈 冰, 刘 涛. 舰船装备状态舰船与故障诊断综述 [J]. 仪表技术, 2017, (5): 12-35.
- [5] 张 威, 魏炳翌, 闻 新. 国内航天器故障诊断技术应用状况分析与展望 [J]. 航空兵器, 2017, (4): 66-74.
- [6] 臧大进, 曹云峰. 故障诊断技术的研究现状及展望 [J]. 西安文理学院学报 (自然科学版), 2011, 14 (1): 33-39.
- [7] 姚 敏, 王绪芝, 赵 敏. 无人机群协同作战任务分配方法研究 [J]. 电子科技大学学报, 2013, 42 (5): 723-727.
- [8] 陈盈果. 面向任务的快速响应空间微型部署优化设计方法研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014.
- [9] 宋业新, 陈绵云, 张曙红. 多目标指派问题及其在军械物资供应中的应用 [J]. 系统工程理论与实践, 2001, 11: 141-144.
- [10] 巴 巍. 实时系统动态优先级任务调度算法的研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
- [11] Nissanke N. Real-time systems [M]: Prentice Hall, 1997.
- [12] 王 沁, 袁玲玲, 张 燕. 固定优先级抢占任务调度算法下非周期任务实时性能研究 [J]. 小型微型计算机系统, 2011, 32 (6): 1025-1029.
- [13] 彭 浩, 韩江洪, 陆 阳, 等. 多处理器硬实时系统的抢占阈值调度研究 [J]. 计算机研究与发展, 2015, 52 (5): 1177-1186.
- [14] Zhao W, Ramamritham K, Stankovic J. Preemptive scheduling under time and resource constraints [J]. IEEE Transactions on Computers, 1987, 36 (8): 949-960.
- [15] Buttzao G. Hard real-time computing systems: predictable scheduling algorithms and applications [M]. Berlin: Springer, 2011.
- [16] 葛永琪, 董云卫, 顾 斌. 能量收集信息物理融合系统抢占阈值调度 [J]. 计算机研究与发展, 2015, 52 (12): 2695-2706.
- [17] Davis R I, Burns A, Marinho J, et al. Global fixed priority scheduling with deferred pre-emption [A]. Proceedings of the 19th IEEE International Conference on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications [C]. Piscataway, NJ: IEEE, 2013: 1-11.
- [18] Retsef Levi, Thomas Magnanti, Jack Muckstadt, et al. Maintenance scheduling for modular systems: Modeling and algorithms [J]. Naval Research Logistics, 2014, 61 (6): 472-488.
- [19] Safari E, Sadjadi S J. A hybrid method for flow shops scheduling with condition-based maintenance constraint and machines breakdown [J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38 (3): 2020-2029.
- [20] Davis R I, Burns A, Marinho J, et al. Global fixed priority scheduling with deferred pre-emption [A]. Proceedings of the 19th IEEE International Conference on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications [C]. Piscataway, NJ: IEEE, 2013: 1-11.
- [21] Wang Y, Saksena M. Scheduling fixed-priority tasks with pre-emption threshold [A]. The 6th IEEE International Conference on Real-Time Computing Systems and Applications [C]. Hong Kong: IEEE, 1999. 328-335.
- [22] Baruah S. The limited-preemption uniprocessor scheduling of sporadic task systems [A]. The 17th Euromicro Conference on Real-Time Systems [C]. Balearic Islands: IEEE, 2005: 137-144.
- [23] Burns A. Preemptive priority appropriate engineering approach. based scheduling [A]. An Advances in Real-Time Systems [C]. London: Prentice Hall, 1994. 225-248.
- [24] 姚双印, 韩庆田. BFOA 在军械装备维修任务调度中的应用 [J]. 海军航空工程学院学报, 2011, 26 (5): 558-575.
- [25] 王 浩, 汤再江, 范 锐. 蜂群算法在装备维修任务调度中的应用 [J]. 计算机工程, 2010, 36 (7): 242-245.
- [26] 崔 嘉, 杨 林, 胡卫民. 改进的细菌觅食算法在航空装备维修任务调度优化中的应用 [J]. 海军航空工程学院学报, 2011, 26 (2): 189-194.
- [27] 王建华, 黄贤凤, 梅 强, 等. 离散可调度时段下多供应商敏捷供应链静态调度优化 [J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21 (10): 2739-2745.
- [28] Nelson R, Holloway C, Mei-Lun Wong R. Centralized scheduling and priority implementation heuristics for a dynamic Job Shop model with due dates and variable processing time [J]. AIIE Transactions, 1977, 9 (1): 95-102.
- [29] 张国辉, 王永成, 张海军. 多阶段人机协同求解动态柔性作业车间调度问题 [J]. 2016, 31 (1): 169-172.
- [30] Yeung W K, Choi T M, Cheng T C E. Supply chain scheduling and coordination with dual delivery modes and inventory storage cost [J]. International Journal of Production Economics, 2011, 132 (2): 223-229.
- [31] Phanden R K, Jain A, Verma R. A genetic algorithm-based approach for job shop scheduling [J]. Journal of Manufacturing Technology Management, 2012, 23 (7): 937-946.
- [32] Rojas Santiago M, Damodaran P, Muthuswamy S, et al. Makespan minimization in a jib shop with a BPM using simulated annealing [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 68 (9-12): 2363-2391.
- [33] Nasiri M, Kianfar F. A guided tabu search/path relinking algorithm for the job shop problem [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 58 (9): 1105-1113.
- [34] Li J Q, Pan Y X. A hybrid discrete swam optimization algorithm for solving fuzzy job shop scheduling problem [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 66 (1): 583-596.
- [35] Korykowski P, Rymaszewski S, Wisniewski T. Ant colony optimization for job shop scheduling using multi-attribute dispatching rules [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 67 (1): 231-241.
- [36] Jackson J R. Simulation research on job shop production [J]. Naval Res Log Quart, 1958, 4 (3): 287-295.
- [37] Szeld Elizabeth Kerr, Roger M. Knowledge-based reactive scheduling [J]. Product Plan & Control, 1994, 5 (5): 124-145.
- [38] Nof S Y, Grant F H. Adaptive/predictive scheduling review and general framework [J]. Product Plan & Control, 1991, 2 (4): 298-312.
- [39] Davis R, Burns A. Improved priority assignment for global fixed priority preemptive scheduling in multiprocessor real-time systems [J]. Journal of Real-Time Systems, 2011, 47 (1): 1-40.
- [40] Pruhs K, Sgall J, Torng E. Handbook of scheduling: Algorithms, models, and performance analysis [M]. BocaBaton, USA: CRC Press, 2004.

- [41] Nejad H T N, Sugimura N, Iwamura K, et al. Multi agent architecture for dynamic incremental process planning in flexible manufacturing system [J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2010, 21 (4): 487-499.
- [42] Doming Lei. Co-evolutionary genetic algorithm for fuzzy flexible job shop scheduling [J]. *Applied Soft Computing Journal*, 2012, 12 (8): 2237-2245.
- [43] Can Y, Yabg Y L, Wang H M, et al. Intelligent job shop scheduling based on MAS and integrated routing wasp algorithm and scheduling wasp algorithm [J]. *Journal of Software*, 2009, 4 (5): 487-494.
- [44] 杨晶, 曾斌. 基于遗传算法的维修任务调度优化及仿真 [J]. *计算机工程*, 2009, 35 (18): 243-248.
- [45] 杜家兴, 陈财森, 童继凤, 等. 基于排队论的装甲装备保障维修任务调度研究 [J]. *计算机仿真*, 2016, 33 (2): 47-51.
- [46] 陈盖凯, 李海瑞. 基于应急模式的飞机维修资源优化调度方法 [J]. *空军预警学院学报*, 2016, 30 (1): 9-16.
- [47] 陈立云, 刘爱珍. 战时维修保障力量的优化调度方法研究 [J]. *军事运筹与系统工程*, 2014, 28 (3): 43-52.
- [48] 王正元, 朱昱, 宋建设, 等. 动态维修任务调度的优化方法 [J]. *机械工程学报*, 2008, 44 (1): 92-97.
- [49] Han C, Lin K, Hou C. Distance-constrained scheduling and its applications to real-time systems [J]. *IEEE Transactions on Computers*, 1996, 45 (7): 814-826.
- [50] Buttazzo G. Rate monotonic vs EDF: judgment days [J]. *Real-Time Systems*, 2005, 29 (1): 5-26.
- [51] Wang Y, Saksena M. Scheduling fixed-priority tasks with preemption threshold [A]. *Proceedings of the 6th International Conference on Real time Computing Systems and Applications [C]*. Hong Kong: IEEE Computer Society Press, 1999: 328-335.
- [52] 夏家莉, 陈辉, 杨兵. 一种动态优先级实时任务调度算法 [J]. *计算机学报*, 2012, 35 (12): 2685-2695.
- [53] Levchuk G M, et al. Normative design of organizations-part I: mission planning [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 2002, 32 (3): 346-359.
- [54] Nakamura Y, Hanafusa H, Yoshikawa T. Task-priority based redundancy control of robot manipulators [J]. *International Journal of Robotics Research*, 1987, 6 (2): 3-15.
- [55] Chanbari S, Othman M. A priority based job scheduling algorithm in cloud computing [J]. *Procedia Engineering*, 2012, 50: 778-785.
- [56] Liu G, Li J, Xu J V. An improved Min-Min algorithm in cloud computing [A]. *Proceedings of International Conference of Modern Computer Science and Application [C]*. Berlin: Springer, 2013: 47-52.
- [57] Li Q, Ba W. A group priority earliest deadline first scheduling algorithm [J]. *Frontiers of Computer Science*, 2012, 6 (5): 560-567.
- [58] 檀明, 魏臻, 韩江洪. 面向抖动优化的任务静态优先级指派算法 [J]. *计算机工程*, 2012, 38 (20): 282-285.
- [59] 彭浩, 蔡美玲, 陈继锋. 静态优先级实时任务的多项式近似分析 [J]. *小型微型计算机系统*, 2012, 33 (12): 2642-2646.
- [60] 彭浩, 韩江洪. 固定优先级延迟抢占分层调度 [J]. *合肥工业大学学报 (自然科学版)*, 2015, 38 (11): 1484-1487.
- [61] 刘亚秋, 赵青华, 景维鹏. 基于动态优先级和萤火虫行为的云任务调度算法 [J]. *计算机应用研究*, 2015, 32 (4): 1040-1043.
- [62] 丛龙水. 动态优先级作业调度算法与实现 [J]. *计算机工程与应用*, 2013, 49 (10): 267-270.
- [63] 李锴, 孙鹏, 孙昱, 等. 基于动态优先级的任务计划建模及方法 [J]. *计算机仿真*, 2015, 32 (9): 28-33.
- [64] 徐玖平, 吴巍. 多属性决策的理论与方法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [65] 轩华. 基于FCFS策略的带时间窗车队调度问题研究 [J]. *交通运输系统工程与信息*, 2013, 13 (6): 140-146.
- [66] Jouini, Oualid. Analysis of a last come first served queueing system with customer abandonment [J]. *Computers and Operations Research*, 2012, 39 (12): 3040-3045.
- [67] 吕学志, 于永利, 张柳, 等. 伴随修理中的维修任务调度策略 [J]. *系统工程理论与实践*, 2013, 33 (1): 209-214.
- [68] 唐恒永, 赵传立. 排序引论 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [69] Glad R F, Pierce R T. A Comparison of Selected Scheduling Heuristics for TACF-4E Maintenance Organization [R]. Air Force Institute of Technology, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, 1976.
- [70] 吕学志, 于永利. 面向任务的装备作战单元维修决策 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
- [71] 任帆, 吕学志, 王宪文, 等. 巡回修理中的维修任务调度策略 [J]. *火力与指挥控制*, 2013, 38 (12): 171-175.
- [72] Mishra S, Batta R, Szczerba R J. A rule based approach for aircraft dispatching to emerging targets [J]. *Military Operations Research*, 2004, 9 (3): 17-30.
- [73] Love A, Tormos P. Analysis of scheduling schemes and heuristic rules performance in resource-constrained multiproject scheduling [J]. *Annals of Operations Research*, 2001, 102 (2): 263-286.
- [74] 吴兵. 柔性资源受限的多模式项目调度问题研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2008.
- [75] 吕学志, 王宪文, 范保新, 等. 定点修理中维修任务调度策略的仿真评估 [J]. *火力与指挥控制*, 2015, 40 (1): 70-76.
- [76] Lee I. H, Chew E P, Teng S, et al. Multi-objective simulation based evolutionary algorithm for an aircraft spare parts allocation problem [J]. *Eurojzvun Journal of Operational Reaserach*, 2008, 189 (21): 476-491.
- [77] Hsu J, Yang S J, Yang D I. Due-date assignment and optional maintenance activity scheduling problem with linear deteriorating jobs [J]. *Journal of Marine Science and Technology*, 2011, 19 (1): 97-100.
- [78] 朱昱, 宋建社, 王正元. 基于最大保障时间的战时装备维修任务调度模型 [J]. *火力与指挥控制*, 2009, 34 (1): 11-14.
- [79] 朱昱, 宋建社, 王正元. 一种基于最大保障时间的战时装备维修任务调度 [J]. *系统工程与电子技术*, 2007, 29 (11): 1900-1903.
- [80] 吕学志, 陈乐, 尹健, 等. 考虑休息的维修任务调度模型及其求解算法 [J]. *兵工学报*, 2014, 35 (12): 2117-2123.
- [81] 王正元, 严小琴, 朱昱, 等. 一种考虑专业的动态维修任务调度的优化方法 [J]. *兵工学报*, 2009, 30 (2): 252-256. 1900-1903.
- [82] 朱昱, 宋建社, 曹继平, 等. 一种考虑装备维修流程的多维修任务调度 [J]. *系统工程与电子技术*, 2008, 30 (7): 1366-1369.
- [83] 万明, 张凤鸣, 樊晓光. 战时装备维修任务调度的两种新算法 [J]. *系统工程与电子技术*, 2012, 34 (1): 107-110.
- [84] 孙志刚, 朱小东, 李锋. 一种考虑权重的多专业流水线批量维修任务调度模型 [J]. *装甲兵工程学院*, 2012, 26 (2): 24-28.