

改进 NSGA-III 算法优化装备动用

宋卫星*, 吴盖印, 孟令舟

(武警工程大学乌鲁木齐校区, 新疆 乌鲁木齐 830049)

摘要:综合考虑装备使用、装备战备以及维修保障效益的现实需求,分析装备动用与维修之间的关系,建立以装备在位率最大、装备战备储备达标率最大、装备完好率最大以及装备维修费用最小为目标,以摩托小时收支平衡为约束的多目标优化模型。根据所建立的模型目标高维、尺度差异大的特性,设计了改进的 NSGA-III 算法,提出基于 DNA 结构的交叉、变异进化操作方法,提高种群的进化效率;设计了改进的自适应归一化方法,增强种群的多样性和算法收敛速度。设计年度装备动用优化案例,进行对比试验,验证了所提模型与算法的可行性和高效性。通过对大量装备动用方案的目标函数值变化趋势,以及单目标函数取得极值的方案详细指标进行分析,提出不同偏好装备动用优化方案。

关键词:装备动用;摩托小时;NSGA-III 算法;优化方法

中图分类号:TP301 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2025)04-227-12



论文
拓展

Improve NSGA-III algorithm for optimizing equipment utilization

SONG Weixing*, WU Gaiyin, MENG Lingzhou

(Urumqi Campus, Engineering University of PAP, Urumqi 830049, China)

Abstract: Considering the practical needs of equipment utilization, equipment preparedness, and the efficiency of equipment maintenance, the relationship between equipment utilization and maintenance was analyzed. A multi-objective optimization model aimed at maximizing equipment presence rate, equipment motor-hour reserve compliance rate, equipment availability rate, and minimizing equipment maintenance costs was established, with the constraint of balancing the revenue and expenditure of motor hours. Given the high-dimensional and large-scale difference characteristics of the established model's objectives, an improved NSGA-III algorithm was designed, which proposed the crossover and mutation evolutionary operations based on DNA, to enhance the evolutionary efficiency of the population. An adaptive normalization method was improved to enhance the population diversity and algorithm convergence speed. Taking the annual equipment utilization optimization as an example, comparative experiments were conducted, which verified the feasibility and efficiency of the proposed model and algorithm. By analyzing the trend of objective function values for a large number of equipment utilization plans and the detailed indicators of plans that achieve extreme values for single objectives, different preference-based equipment utilization optimization plans were proposed.

Keywords: equipment utilization; motorcycle hours; NSGA-III algorithm; optimization method

装甲装备具有强大的防护性能、火力优势和突击能力,是地面作战的主要武器装备^[1]。装甲装备技术管理规范依据摩托小时消耗情况确定维修时间和方式,装备动用和维修之间具有紧密耦合关系^[2]。研究装甲装备动用和维修规律,整体优化制定装备动用和维修计划,能够有效恢复装备战备技术性能,稳固保持装备完好率、在位率、摩托小时储备率等战备状态,满足日常战备训练和战时任务动用需求,同时也为加强其他类型装备技术管理提供借鉴,对于提高部队建设水平具有

重要意义。

目前,对于装甲装备动用与维修之间的关系及优化研究较少。以美军为代表的北约军队训练和作战使用两套装备,不考虑装备动用与维修平衡及优化问题,国外很少涉及此类研究。国内,周云彦等以装备摩托小时形成梯次形储备、尽早产生预防性维修装备为目标,对新列装装备动用进行了仿真优化^[3];梅国建等对服役期较长的装甲装备动用进行研究,建立了计划退出现役时间和可增加动用装备之间的决策模型^[4];孟庆均等结合装

收稿日期:2024-10-30

基金项目:国家部委基金资助项目(LJ20232B030128)

*第一作者:宋卫星(1982—),男,河北遵化人,讲师,博士,E-mail:88159073@qq.com

引用格式:宋卫星,吴盖印,孟令舟.改进 NSGA-III 算法优化装备动用[J].国防科技大学学报,2025,47(4):227-238.

Citation: SONG W X, WU G Y, MENG L Z. Improve NSGA-III algorithm for optimizing equipment utilization[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2025, 47(4): 227-238.

备在役考核工作,建立评价指标体系,对装备动用进行评估^[5];曹军海等对装备动用业务流程进行描述,采用面向对象 Petri 网络(object oriented Petri nets, OOPN)方法,构建了面向对象的 Petri 网模型,对装备动用业务进行建模仿真^[6];李羚玮等依据摩托小时储备将装备分为重点用车、一般用车和控制用车,在预设动用顺序的基础上对装备动用策略进行了仿真研究^[7];蔡赛男基于摩托小时收支平衡,以装备均衡送修、科学调配资源为目标,建立装备动用优化模型,设计天牛群优化(beetle particle optimization, BSO)算法求解得出动用方案^[8];李东京等根据装备动用与维修标准,按照全寿命管理的观点,建立多 Agent 模型,对较长周期内装备动用和维修进行仿真评估^[9]。以上研究还存在诸多不足:研究的范围不够全面,有的针对新列装装备、有的针对即将退役装备;研究得不够深入,没有定量分析装备动用与维修之间的关系,根据装备摩托小时储备、维修间隔期等进行仿真计算得出动用策略;研究与实际贴得不紧,没有充分考虑装备使用、战备状态、维修效益等诸多现实需求,研究的假设和目标过于简单。

非支配排序遗传算法Ⅲ(non-dominated sorting genetic algorithm Ⅲ, NSGA-Ⅲ)算法是求解 3 维以上高维多目标优化问题的一种有效算法,但其仍存在局部搜索较差这一局限性。当前,对 NSGA-Ⅲ算法的改进主要集中在以下几个方面:优化参考向量,Asafuddoula 等利用自适应增强学习算法增加积极参考向量、删除积极向量,引导种群向 Pareto 前沿进化,提升算法的进化速度和种群的多样性^[10];优化编码,Chai 等采用了一种高度可扩展的编码方法进行编码,使第一代解最大限度地接近最优值,提升寻优能力^[11];优化进化策略,Zhang 等利用二阶差分策略和随机策略来改善下一代种群中的个体,并仿真验证了改进算法的收敛性和多样性^[12]。以上针对 NSGA-Ⅲ算法的改进都是一般性理论方法研究,还不能完全适应装备动用优化问题。

针对以上问题,本文以装备动用方案为研究对象,基于预防性维修理论,研究建立装备动用优化模型和求解算法,为部队优化装备动用、提高维修效益提供指导。

1 问题描述

装备动用是对装备使用的管理,以满足部队年度训练任务要求为牵引,根据所属装备摩托小时储备等技术状况信息,并遵循一定的规定要求,

将每项使用任务分配到单台装备,根据装备预期使用时间预测动用装备使用期结束后的技术状况及需要进行的预防性维修类型^[13]。一方面,制定装备动用计划为完成作战训练任务提供可使用装备。另一方面,装备动用决定装备摩托小时消耗和部组件使用损耗,根据维修间隔期标准和装备故障概率,可以确定装备预防性维修时间和任务量,预测装备随机故障,进而为提前筹措各类维修资源提供依据。

1.1 预防性维修方式

按照以可靠性为中心的维修理论(reliability centred maintenance, RCM),相比装备故障后再采取修复性维修措施,装甲装备在故障前按照定时定程标准采取更为经济的预防性维修方式。以装备车体和发动机摩托小时储备为依据,确定维修间隔期标准,将维修分为大修、中修和小修 3 个等级。装备在使用过程中车体和发动机摩托小时储备下降,达到维修间隔期标准后进行相应等级维修。装备在预防性维修期间不能使用,大修、中修后,车体、发动机翻新或更换,大修生产新的车体和发动机摩托小时,中修生产新的发动机摩托小时。每年预防性维修装备数量要相对平稳,不能出现大量装备集中到达维修间隔期的情况。因此在制定装备动用计划时要充分考虑维修情况。

1.2 摩托小时收支平衡要求

部队要做好随时遂行任务的准备,必须维持所属装备发动机摩托小时储备水平,以保证可持续使用。为长期、稳定保持装备摩托小时储备,要求部队年度装备动用消耗的发动机摩托小时和预防性维修生产的发动机摩托小时基本平衡。年度装备动用消耗的发动机摩托小时根据训练用装需求计算。装备维修生产发动机摩托小时^[2]为:

$$T_p = \sum_{i=1}^n (X_i^1 \cdot t_i^1 + X_i^2 \cdot t_i^2) \quad (1)$$

式中, T_p 为年度装备预计生产摩托小时, X_i^1 为预计年度中修回营的第 i 台装备数量, t_i^1 为预计年度中修后回营的第 i 台装备发动机额定使用期, X_i^2 为预计年度大修回营的第 i 台装备数量, t_i^2 为预计年度大修后回营的第 i 台装备发动机额定使用期, n 为装备数量。

在制定装备动用计划时,必须考虑动用装备等级和维修生产摩托小时数量,以满足摩托小时收支平衡要求,即:

$$|T_p - Q| \leq v \quad (2)$$

式中, Q 为年度装备使用消耗摩托小时, v 为允许

偏差常量。

2 优化模型

2.1 优化对象

部队编制装甲装备数量为 n , 每台装备的车体摩托小时储备为 R_i , 发动机摩托小时储备为 r_i , 大修间隔期为 $2l$, 中修间隔期为 l 。如 $r_i = R_i$, 则装备最近一次预防性维修为中修; 如 $r_i + l = R_i$, 则装备最近一次预防性维修为大修。

年度训练的装备使用需求为 Q 发动机摩托小时, 训练月数量为 m , 建立装备动用时间分配矩阵:

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1m} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ d_{n1} & d_{n2} & \cdots & d_{nm} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, $d_{ij} (i = 1, 2, \cdots, n; j = 1, 2, \cdots, m)$ 为第 i 台装备第 j 月分配消耗发动机摩托小时数量, $d_{ij} \leq 128$ (按每月最多训练使用 4 周, 每周 4 天, 每天 8 小时计算), $d_{ij} = 0$, 表示不分配使用。装备动用方案应满足部队装备使用需求, 即:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m d_{ij} = Q \quad (4)$$

2.2 优化目标

2.2.1 装备完好率

装备完好是指装备技术状况达到“清洁完整、润滑周到、调整正确、紧固适当、没有故障”标准, 机动、火力、信息、防护、保障等主要功能完好, 可用于执行日常战备训练任务。装备完好率为完好装备数量与编配装备数量的比值。由于现代武器装备系统结构复杂, 判断装备是否完好, 涉及对各系统的数据采集、故障诊断、状态评估等多种技术方法和步骤, 理论和实践难度都很大, 目前还尚未形成统一的和可操作的技术手段、评判标准和方法流程。为简化问题研究, 应用韦布尔分布计算装备完好率。以发动机摩托小时储备、车体摩托小时消耗为指标, 综合考虑装备故障规律, 计算第 i 台装备第 j 月完好率, 即:

$$w_{ij} = \begin{cases} 0 & r'_{ij} = l \text{ 或 } R'_{ij} = 2l \\ 1 - \left[\frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{\delta r'_{ij} - \gamma}{\alpha} \right)^{\beta-1} + \frac{\eta}{\theta} \left(\frac{\omega R'_{ij} - \gamma}{\theta} \right)^{\eta-1} \right] & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

装备完好率随装备发动机摩托小时消耗 r'_{ij} 、车体摩托小时消耗 R'_{ij} 变化, 呈韦布尔分布。根据部队实际装备故障数据, 拟合得出 $\alpha, \beta, \delta, \theta, \eta, \omega, \gamma$ 等参数。当装备发动机摩托小时、车体摩托小

时消耗达到大、中修标准后装备进行预防性维修, 维修期间完好率为 0。

单位年度整体装备完好率为各月全部装备完好率的平均值:

$$A = \frac{\sum_{j=1}^{12} \sum_{i=1}^n \frac{w_{ij}}{n}}{12} \quad (6)$$

装备在使用过程中, 随着发动机摩托小时、车体摩托小时消耗增加, 故障率加大、完好率下降^[14]。装备使用中发生故障即进行修复性维修, 不影响使用任务分配, 但单位整体完好率下降将影响部队作战能力。装备大、中修期间定义完好率为零, 但修竣返营后性能提高, 完好率大幅提升, 在计划装备使用时应着力提高单位整体装备完好率。

2.2.2 装备在位率

装备在位是指装备在营区、临时部署点位、遂行任务等情况下处于部队掌握控制的状态。装备在位率为在位装备数量与编配装备数量的比值。本文研究的装备不在位, 主要考虑装备送到相关修理机构进行大、中修情况。装备储备发动机摩托小时消耗完后进行中修, 储备车体摩托小时消耗完后进行大修, 在中修期 t_m 、大修期 t_h 内装备不在位。初始化装备在位矩阵:

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1m} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \cdots & b_{nm} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中, b_{ij} 为第 i 台装备第 j 月的在位情况, 1 表示在位, 0 表示不在位。计算装备发动机摩托小时和车体摩托小时储备消耗, 达到相应标准, 对装备送大、中修, 调整装备在位矩阵:

$$b_{ij} = 0 \quad r_{ik} = 0 \quad k < j \leq k + t_m \quad (8)$$

$$b_{ij} = 0 \quad R_{is} = 0 \quad s < j \leq s + t_h \quad (9)$$

式(8)表示装备发动机摩托小时储备消耗完毕后送中修, 中修期间装备不在位; 式(9)表示装备车体摩托小时储备消耗完毕后送大修, 大修期间装备不在位。在营装备数量即为全部装备数量减去送修装备数量。部队装备在位率用各月在位装备数量与编制装备数量比值的平均数计算, 即:

$$O = \frac{\sum_{j=1}^{12} \sum_{i=1}^n \frac{b_{ij}}{E_a}}{12} \quad (10)$$

式中, E_a 为编配装备数量。同装备完好率类似, 保持较高的装备在位率, 是部队时刻处于高度戒备状态、提高应急处置能力、有效履行多样化军事任务的重要基础。

2.2.3 战备储备达标率

部队为了适应各种复杂艰巨的作战任务,必须确保装备的持续作战能力,这就要求装备的发动机摩托小时储备达到一定标准要求,用装备的发动机摩托小时储备 r_i 与装备大、中修后发动机额定使用期 t_i^1 的比值衡量,即:

$$\frac{r_i}{t_i^1} \geq u \quad (11)$$

式中, u 为标准常数。满足式(11)的装备战备储备达标,整个部队的装备战备储备达标率,用各月战备储备达标装备数量 E_c 与编制装备数量比值 E_a 的平均数衡量,即:

$$S = \frac{\sum_j \frac{E_c}{E_a}}{12} \quad (12)$$

合理分配装备使用摩托小时消耗,科学维修装备生产摩托小时,提高装备战备储备达标率是装备使用优化的重要目标。

2.2.4 维修费用

装备在维修过程中会产生大量的人力、器材、耗材消耗,以及场地设施、机具设备磨损,形成维修费用。装备维修费用主要包括预防性维修费用和修复性维修费用。装备大修、中修等预防性维修是计划性维修,着眼提高装备可靠性,按照标准的工艺流程组织实施,部件拆卸、检测、维护、更换等项目内容具体明确,与装备技术状况无关,每台次装备维修费用固定。修复性维修是在装备发生故障后的临机维修,根据装备技术状况采取适当的检测项目、方法步骤和器材更换。由于同型装备故障类型大致相同,为了简化问题研究,采用平均值计算修复性维修费用。修复性维修费用 C_1 、预防性维修费用 C_2 以及总维修费用 C 计算如下:

$$C_1 = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (1 - w_{ij}) \cdot e_r \quad R_{ij} \neq 0, r_{ij} \neq 0 \quad (13)$$

$$C_2 = n_m \cdot e_m + n_h \cdot e_h \quad (14)$$

$$C = C_1 + C_2 \quad (15)$$

其中, n_m 、 n_h 分别为年度中、大修装备数量, e_r 、 e_m 、 e_h 分别为单台装备修复性维修平均费用、中修标准费用、大修标准费用。在计划装备动用时,应着力降低装备维修费用。

综上所述,计划装备使用的优化目标为:

$$\max: A, O, S \quad (16)$$

$$\min: C \quad (17)$$

约束条件为:

$$\sum_{j=1}^m d_{ij} \leq r_i \quad (18)$$

$$\begin{cases} d_{ij} = 0 \\ b_{ij} = 0 \end{cases} \quad r_i = 0 \quad (19)$$

式(18)表示第 i 台装备分配使用消耗的摩托小时数量不能超过其摩托小时储备,式(19)表示第 i 台装备储备摩托小时消耗完后即送修,维修期间装备不在位,修竣回营后当年不再分配使用。

3 改进的 NSGA-III 算法

NSGA-III 算法是由 Deb 提出,在 NSGA-II 基础上改进升级的一种多目标优化算法^[15]。NSGA-II 用于处理目标数不超过 3 的低维优化问题,在 4 维以上的高维多目标优化问题中,种群非支配个体数量呈指数增加,在同一 Pareto 等级中很难再通过拥挤度计算排序并区分好坏^[16]。NSGA-III 算法提出了一种基于参考点的排序机制,利用小生境选择策略,帕累托解分布更加均匀,为高维多目标优化问题提供多个平衡的解决方案^[17],也存在复杂度较高、变异策略单一、缺乏自适应调整机制等问题,不具有适应不同问题的动态特性^[18]。装备动用优化模型属于高维多目标优化,可以应用 NSGA-III 算法求解。但是优化模型具有逻辑关系复杂、个体编码内部关联性强、目标函数尺度差异大等特点,传统 NSGA-III 算法无法直接适用。根据优化模型的特点,改进 NSGA-III 算法的流程、个体进化方法和目标函数自适应归一化方法,提高算法的运行速度和准确性。

3.1 算法流程

步骤 1: 设定算法基本参数,包括种群规模 G 、交叉概率 P_c 、变异概率 P_m 、算法循环次数 I 、参考点等分数目 N_r 。

步骤 2: 初始化种群,根据装备训练时间需求、装备数量、装备摩托小时储备、月摩托小时分配限额等条件,随机生成个数为 G 的染色体种群。

步骤 3: 根据式(6)、式(10)、式(12)、式(15)分别计算每个染色体的目标函数 A, O, S, C 。

步骤 4: 根据 Pareto 支配关系,对染色体进行快速非支配排序,计算被支配染色体个数和支配染色体集合,区分每个染色体的 Pareto 等级 H_i 。

步骤 5: 挑选前 l 等级染色体进入父代种群,前 l 等级染色体数量 $n_l < \frac{G}{2}$,且前 $l+1$ 等级染色

体数量 $n_{l+1} > \frac{G}{2}$ 。

步骤 6:生成参考点。

步骤 7:利用计算多维解的超平面与坐标轴距离的方法,对第 $l+1$ 等级 F_{l+1} 个染色体的解进行归一化。

步骤 8:建立第 $l+1$ 等级染色体与参考点的联系,利用小生境保留方法,从中遴选 $\frac{G}{2} - n_l$ 个染色体进入父代种群。

步骤 9:对 $\frac{G}{2}$ 个父代种群进行交叉、变异操作得到子代种群,将父代种群与子代种群合并生成新一代种群。

步骤 10:重复步骤 3~9,直至迭代结束,种群中 Pareto 等级 $H_i = 1$ 的染色体为最优解集。

3.2 基于 DNA 结构的交叉、变异操作

第 2 节中建立的优化模型,以所有装备动用方案为优化对象,在运用 NSGA-III 算法进行优化计算时,需以 1 组编码表示 1 台装备的摩托小时使用方案,多个编码组合在一起表示整体装备动用方案,构成种群的 1 个个体。由于装备的使用方案受到摩托小时储备、月分配上限等诸多限制,编码组中各编码具有很强的关联性。在种群进化过程中,传统 NSGA-III 算法以单个编码为单位进行交叉、变异操作,会破坏这种关联性,产生大量不合理的装备动用方案。针对模型编码组内联系紧密、组间相对独立的特点,受人类染色体、DNA、基因的结构启发,提出基于 DNA 结构的个体初始编码及交叉、变异进化操作方法,提高种群的进化效率。

3.2.1 初始编码方法

按照随机的顺序逐台遴选装备,随机分配其

各月使用摩托小时 t_{ij} ,单台装备分配使用摩托小时之和 $t_i = \sum_{j=1}^{12} t_{ij}$ 要小于其摩托小时储备。当分配到第 k 台装备时,如已分配的摩托小时总和 $T_k = \sum_{i=1}^k t_i$ 大于年度训练需求 Q ,对第 k 台装备进行重新分配,使其分配摩托小时为 $t_k = Q - T_{k-1}$ 。如图 1 所示,单台装备各月分配使用摩托小时 t_{ij} 为 1 个基因,每台装备的分配方案为 1 个 DNA,整个装备使用分配方案为 1 个染色体。

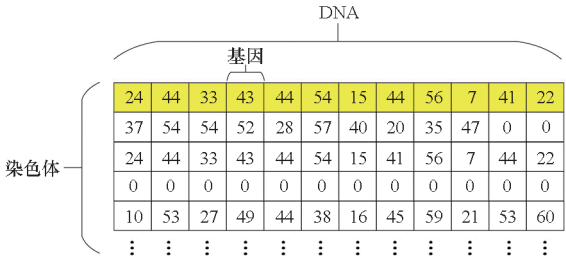


图 1 染色体初始编码方法
Fig. 1 Chromosome initial encoding method

3.2.2 交叉操作方法

为了提高算法的精准度和运行效率,改变传统 NSGA-III 算法以基因为单元进行交叉、变异的方法,以 DNA 为单元作为父、子代染色体遗传方法。交叉遗传操作时,将父代染色体打乱顺序,平均分为两组,对应顺序的染色体依次进行交叉。如图 2 所示,随机抽选两个父代染色体中各 C_n 个 DNA,对应位置两两交换,生成子代染色体。

3.2.3 变异操作方法

变异遗传操作时,对每个父代染色体,将其 DNA 分为全零(未分配使用时间装备)和非全零(分配使用时间装备)两组,每组各随机抽选 M_n 个 DNA,全零 DNA 进行分配时间编码,非全零 DNA 进行全零编码,生成子代染色体,如图 3 所示。

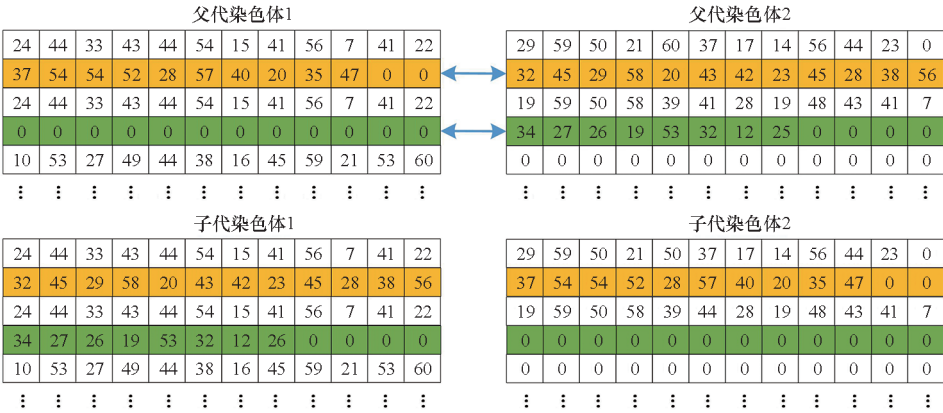


图 2 交叉操作方法
Fig. 2 Crossover encoding method

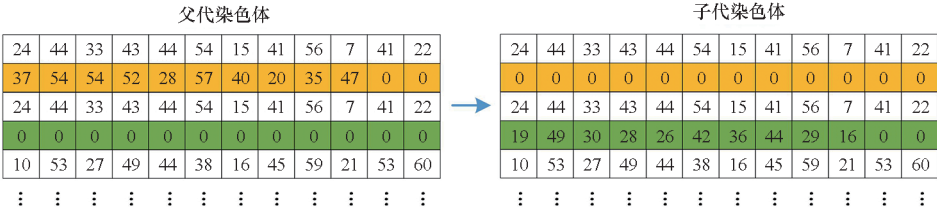


图 3 变异操作方法

Fig. 3 Mutation encoding method

3.2.4 进化调整方法

交叉操作将两个染色体内 C_n 个对应的 DNA 进行交换,变异操作在染色体内随机挑选 M_n 个非全零 DNA 进行全零编码,对 M_n 个全零的 DNA 进行摩托小时分配编码,两种进化操作后 DNA 所表示的单台装备使用方案是合理的,但染色体所表示的整体装备摩托小时分配总数会发生变化,与年度训练需求不符。因此,需要对子代染色体进行调整。将子代染色体非全零 DNA 分配时间逐个相加,当加到第 n 个 DNA 时,如分配时间和 T_n 等于年度训练需求 Q ,则不需要调整;如 T_n 大于 Q 则对第 n 个 DNA 进行重新编码,使其分配时间为 $t_n = Q - T_{n-1}$;如 T_n 小于 Q ,则对全零 DNA 逐个进行编码,直至分配时间和等于 Q 。

3.3 改进的自适应归一化方法

传统 NSGA-III 算法采用固定参数进行归一化,不能适应不同特征的各类优化问题,当目标函数的尺度差异很大时,会导致某些目标在优化过程中被过分强调或忽视,尤其当目标函数存在极端值时,归一化后的目标函数值将分布不均匀,进而影响算法性能。由于优化模型目标函数中维修费用和其他目标函数相差 3 个数量级,使用传统 NSGA-III 算法计算目标函数超平面与坐标轴距离时,将会产生奇异矩阵,无法得出唯一解,归一化过程中断,算法失效^[19]。对此,改进设计自适应归一化方法,有效地处理这种尺度差异,动态调整每个目标的权重,在搜索过程中不会偏重于某个目标。一方面,能够减少目标函数数值范围差异导致某些解过早淘汰的问题,保持种群的多样性;另一方面,能够快速定位到帕累托前沿,提高算法的收敛性。

3.3.1 确定参考点

为确保高维多目标优化问题解能够均匀分布,NSGA-III 算法预定义一组参考点对解进行遴选保留。对于 M 维多目标,参考点均匀分布在 $M-1$ 维超平面上,形成一个与所有目标轴等距的单纯形。通过设定每个目标值的划分数 p ,可以

确定参考点总数:

$$H = \frac{(M+p-1)!}{p! (M-1)!} \tag{20}$$

3.3.2 自适应归一化

为了便于将解与参考点比较联系,对目标函数进行归一化。目标函数 $f_i(x)$ ($i = 1, 2, \dots, M$) 被替代为:

$$\tilde{f}_i(x) = \frac{f_i(x) - z_i^*}{z_i^{\text{nad}} - z_i^*} \tag{21}$$

式中: z_i^* 为最小的 f_i 值; z_i^{nad} 是上一代计算的最差点的第 i 维的目标值,其计算较为复杂。利用 ASF 函数计算解 x 对目标轴 f_j 的逼近:

$$ASF(x, \mathbf{w}_j) = \max_{i=1}^M \left\{ \frac{1}{w_{j,i}} |\tilde{f}_i(x)| \right\} \tag{22}$$

式中, $\mathbf{w}_j = (w_{j,1}, w_{j,1}, \dots, w_{j,M})^T$ 是目标值 f_j 的方向,如果 $i \neq j, w_{j,i} = 0$, 否则 $w_{j,i} = 1$ 。对于 $w_{j,i} = 0$, 用一个很小的值 10^{-6} 来替代它。目标轴 f_j 的极值点 $\mathbf{g}_j$ 为 $ASF(x, \mathbf{w}_j)$ 值最小的解 x 的目标向量,即 $\mathbf{g}_j = \mathbf{f}(x)$ 。

计算所有目标轴,得到 M 个极值点 $\mathbf{g}_1, \mathbf{g}_2, \dots, \mathbf{g}_M$, 构建一个超平面。设 $a_1, a_2, \dots, a_M$ 分别表示超平面在 $(1, z_2^*, \dots, z_M^*)^T, (z_1^*, 1, \dots, z_M^*)^T, \dots, (z_1^*, \dots, z_{M-1}^*, 1)^T$ 上的截距,利用向量 $\mathbf{u} = (1, 1, \dots, 1)^T$, 矩阵 $\mathbf{E} = (\mathbf{g}_1 - \mathbf{z}^*, \mathbf{g}_2 - \mathbf{z}^*, \dots, \mathbf{g}_M - \mathbf{z}^*)^T$ 计算截距:

$$\begin{pmatrix} (a_1 - z_1^*)^{-1} \\ (a_2 - z_2^*)^{-1} \\ \vdots \\ (a_M - z_M^*)^{-1} \end{pmatrix} = \mathbf{E}^{-1} \mathbf{u} \tag{23}$$

z_i^{nad} 的值更新为 a_i , 目标函数用式(21)进行更新。如果矩阵 $\mathbf{E}$ 的秩小于 M , 就可能在某些方向得不到截距,或者截距 $a_i \leq z_i^*$, 这时 z_i^{nad} 更新为全部解在目标 f_i 上的最大值。

4 案例仿真

4.1 仿真条件

参照业务工作实际,设定编配装甲装备数量为 100 台,摩托小时储备以 100 h 划分,分别为 5、

14、9、22、50 台,训练需求为 15 000 h、单月使用范围为 0~60 h,装备中修间隔期、时间、费用分别为 500 h、2 月、20 万元,大修间隔期、时间、费用分别为 1 000 h、4 月、40 万元,平均故障维修费用为 0.5 万元,战备储备率标准为 0.6。

算法运行初始参数设置为: $G=500$, $P_c=0.07$, $P_m=0.1$, $C_n=6$, $M_n=4$, $I=500$, $N_r=10$ 。

4.2 算法比较分析

按照建立的优化模型,以装备在位率高、装备战备储备达标率高、维修费用小、装备完好率高为优化目标,利用 NSGA-III 算法和改进的 NSGA-III 算法分别进行 500 次迭代仿真计算,对比分析仿真结果。

NSGA-III 算法和改进 NSGA-III 算法分别用时 38 min 10 s、21 min 43 s。改进 NSGA-III 算法计算速度更快。采用三维投影和颜色映射结合的方法,观察两种算法 Pareto 等级为 1 的染色体全貌,如图 4 所示。

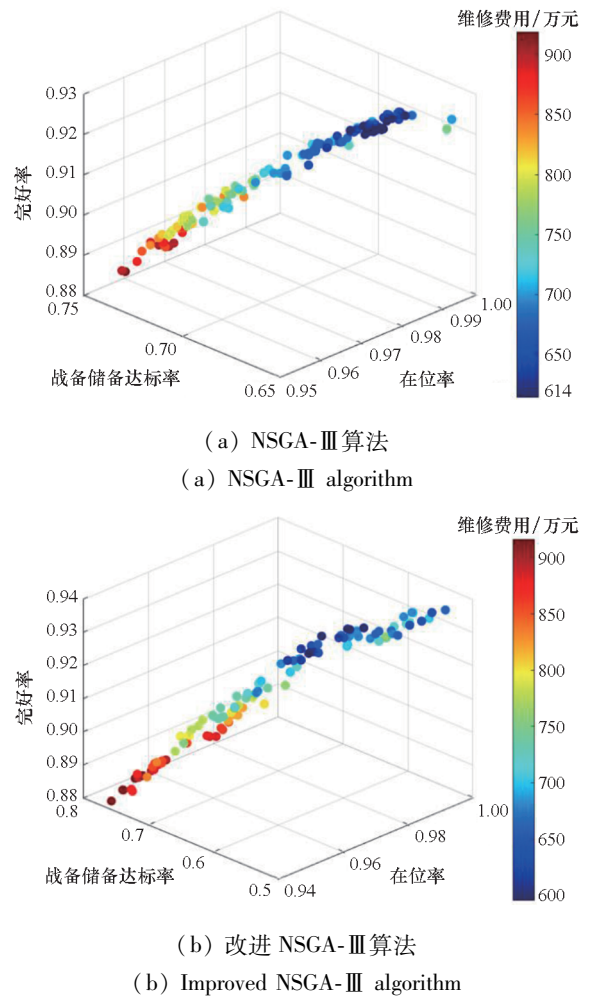


图 4 两种算法计算 Pareto 前沿全貌

Fig.4 Pareto fronts of two algorithms

NSGA-III 算法和改进 NSGA-III 算法计算结果

如图 5、图 6 所示。各目标函数得到的极值如表 1 所示,改进的 NSGA-III 算法计算单目标函数极值更优,寻优性能更强。

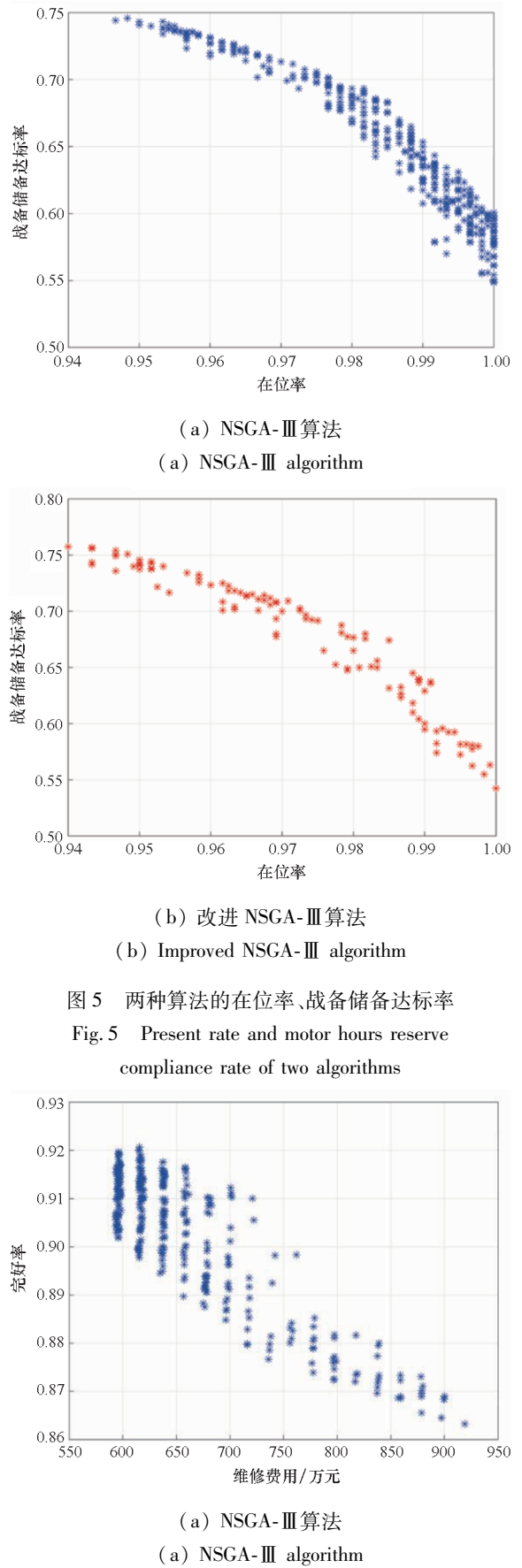
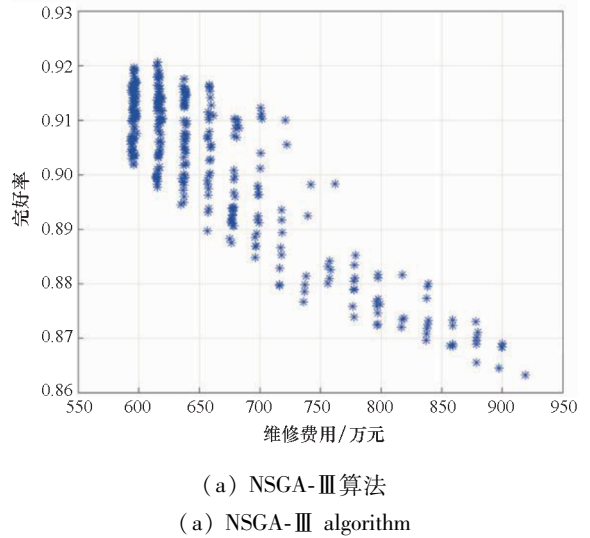
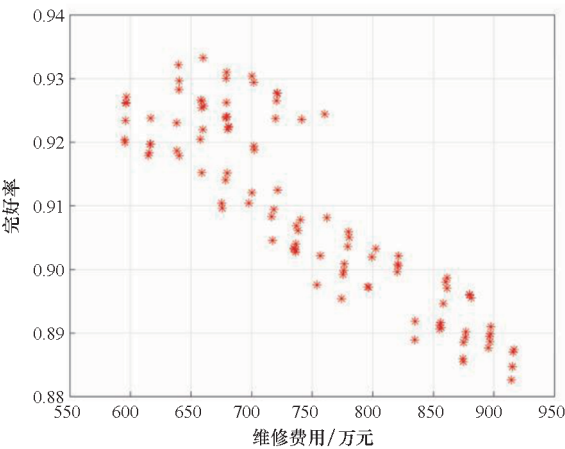


图 5 两种算法的在位率、战备储备达标率
Fig.5 Present rate and motor hours reserve compliance rate of two algorithms





(b) 改进 NSGA-Ⅲ 算法

(b) Improved NSGA-Ⅲ algorithm

图 6 两种算法计算完好率、维修费用

Fig. 6 Availability rate and maintenance costs of two algorithms

表 1 两种算法计算各函数最优解

Tab. 1 Optimal solutions for each function of the two algorithms

算法	在位率	战备储备达标率	维修费用/万元	完好率
NSGA-Ⅲ	1	0.745 8	593.265 5	0.921 7
改进 NSGA-Ⅲ	1	0.757 5	595.260 7	0.933 3

5 装备动用策略分析

5.1 优化方案目标函数值随关键指标值变化趋势

改进的 NSGA-Ⅲ 算法计算得出 Pareto 等级为 1 的染色体 250 个,表示不同偏好的优化动用方案。逐个计算各方案的动用装备数量、动用装备发动机摩托小时储备率、动用已中修和未中修装备数量比率、跨年度装备维修期比率这 4 个关键指标。

动用装备数量,即分配使用过的装备数量,即染色体中该装备对应的 DNA 编码非全零的装备数量,利用式(24)计算。

$$n_u = |D_u| \quad D_u = \{d_i \in D | d_{ij} \neq 0\} \quad (24)$$

单台装备发动机摩托小时储备率为其发动机摩托小时储备数量与发动机额定使用期的比值,可以衡量装备的可持续使用能力。动用装备发动机摩托小时储备率是全部 n_u 台动用装备年初发动机摩托小时储备率的平均值,可以反映动用装备发动机摩托小时储备的总体情况,利用式(25)计算。

$$S_u = \sum_{i=1}^{n_u} \frac{r_{i0}}{t_i^1} / n_u \quad (25)$$

已中修装备和未中修装备即将进行的下一次预防性维修分别是大修、中修。动用已中修和未中修装备数量比率,可以反映动用装备即将进行的下一次预防性维修趋势。

跨年度装备维修期,是指装备预防性维修期中在下一年度的月份数。跨年度装备维修期比率,是本年度使用达到预防性维修标准的所有装备在下一年度内的维修期之和与全部维修期之和的比值。

对得出 250 个装备动用优化方案的以上 4 个指标值进行升序排序,以此作为横坐标,以维修费用、在位率、战备储备达标率、完好率目标函数值为纵坐标,画出目标函数值随各指标的变化曲线。为便于观察,将在位率、战备储备达标率、完好率函数值分别乘以 1 000,维修费用函数值(为便于显示,省略单位万元)不变,如图 7~10 所示。

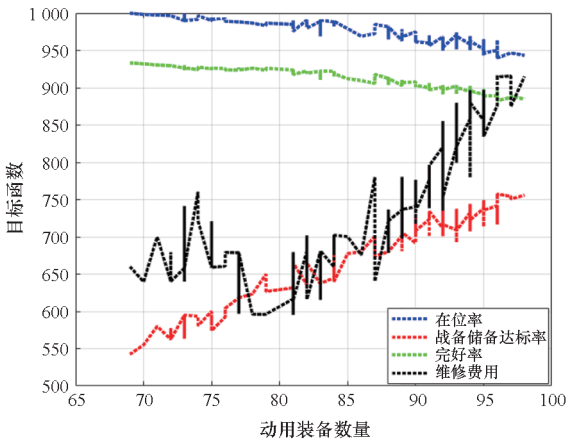


图 7 目标函数随动用装备数量变化曲线

Fig. 7 Variation curves of objective functions with the number of deployed equipment

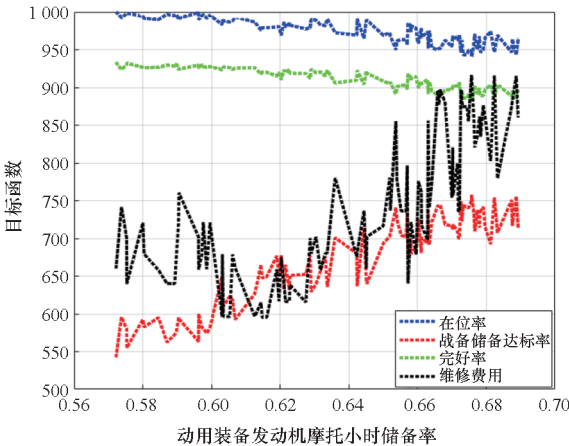


图 8 目标函数随动用装备发动机摩托小时储备率变化曲线

Fig. 8 Variation curves of objective functions with the motor hour reserve rate of deployed equipment engine

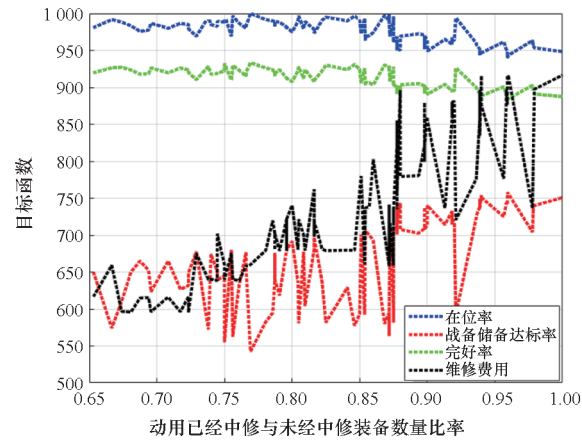


图 9 目标函数随动用已中修和未中修装备数量比率变化曲线

Fig. 9 Variation curve of objective functions with the ratio of medium repaired and none medium repaired number of deployed equipment

5.2 单目标函数极值的优化方案指标

选取 250 个染色体结果中各目标函数取得极值的 4 个装备动用方案,计算各方案的动用装备数量、摩托小时储备、预防性维修等级装备数量、年度维修期等 21 个指标值。其中,不同发动机摩托小时储备动用装备数量,分别为动用装备发动机摩托小时储备为 0 ~ 100、101 ~ 200、201 ~ 300、301 ~ 400、401 ~ 500 之间的装备数量,如表 2 所示。

表 2 改进 NSGA-III 算法计算各目标函数极值动用方案相关指标

数值分析	在位率	战备储备达标率	维修费用	完好率
装备在位率	1	0.94	0.979 2	1
装备战备储备达标率	0.542 5	0.757 5	0.647 5	0.542 5
装备维修费用/万元	660.034 2	914.422 5	595.260 7	660.034 2
装备完好率	0.933 3	0.882 6	0.920 4	0.933 3
动用装备数量	69	96	81	69
不同发动机摩托小时储备动用装备数量	0,0,6,15,48	5,14,9,18,50	2,7,7,16,49	0,0,6,15,48
动用装备发动机摩托小时储备率	0.572 2	0.675 7	0.614 8	0.572 2
动用已中修装备数量	30	47	34	30
动用未中修装备数量	39	49	47	39
动用已、未中修装备比率	0.769 2	0.959 2	0.777 8	0.769 2
大、中修装备数量	28	32	28	28
维修装备与动用装备数量比	0.41	0.33	0.35	0.41
大修装备数量	3	12	0	3
年内大修期/月	0	48	0	0
跨年度大修装备数量	3	0	0	3
跨年度大修期/月	6	0	0	6
中修装备数量	25	20	28	25
年内中修期/月	0	24	25	0
跨年度中修装备数量	25	8	16	25
跨年度中修期/月	50	16	31	50
跨年度维修期比率	1	0.181 8	0.553 6	1

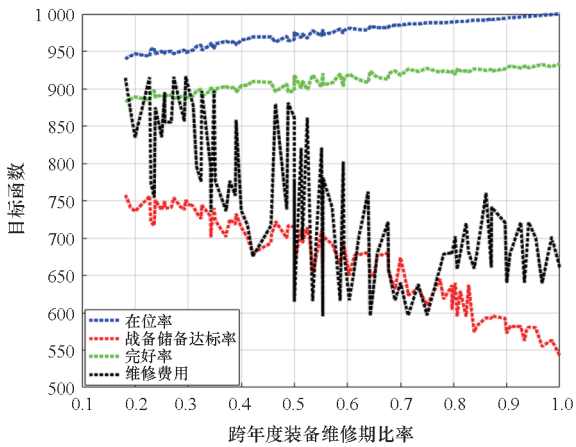


图 10 目标函数随跨年度装备维修期比率变化曲线

Fig. 10 Variation curves of objective functions with the ratio of cross-year equipment maintenance periods

5.3 装备动用优化策略

综合分析优化方案目标函数随 4 个关键指标的变化趋势,以及目标函数取得极值的 4 个方案指标值,可以得出不同偏重的装备动用优化策略。

5.3.1 偏重在位率的装备动用优化策略

1)减少动用装备数量。如图 7 所示,装备在位率随动用装备数量增加呈明显下降趋势;如表 2所示,在装备在位率取得极大值 1 时,动用装备数量最少为 69。

2)使装备在下一年度进行预防性维修。如图 10 所示,装备在位率随跨年度维修期比率增加呈明显上升趋势;如表 2 所示,当装备在位率取得极大值 1 时,跨年度维修期比率最大为 1,年内没有大、中修装备。

3)均匀使用装备。如图 11、图 12 所示,当装备在位率取得极大值 1 时,各月动用装备数量、动用摩托小时数量较为均匀,预防性维修集中在下一年度。

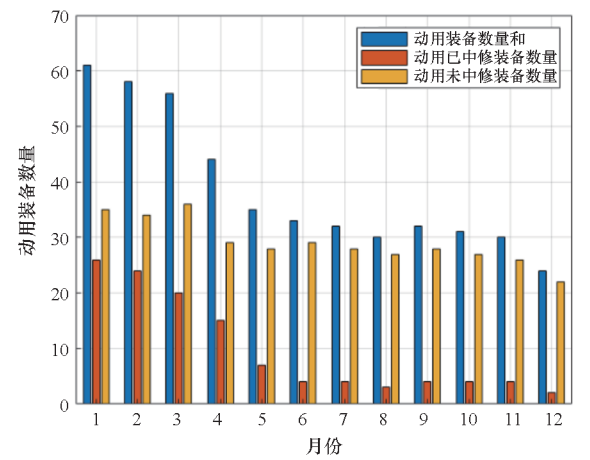


图 11 在位率取得极值时各月动用装备数量
Fig. 11 Monthly number of deployed equipment when present rate reaches the extreme value

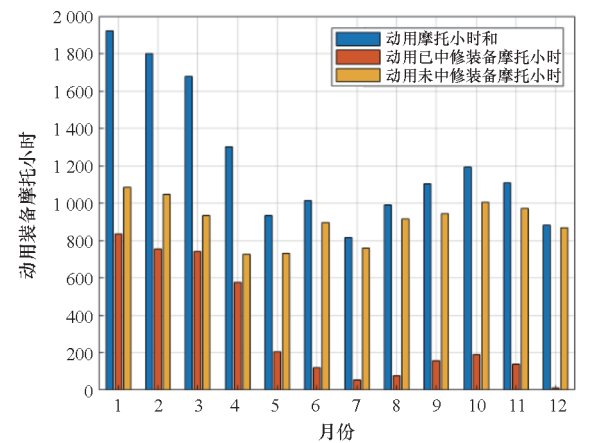


图 12 在位率取得极值时各月动用摩托小时数量
Fig. 12 Monthly quantity of motor hours used when present rate reaches the extreme value

5.3.2 偏重战备储备达标率的装备动用优化策略

1)增加动用装备数量。如图 7 所示,战备储备达标率随动用装备数量增加呈明显上升趋势;如表 2 所示,在战备储备达标率取得极大值 0.757 5 时,动用装备数量为最大值 96。动用装备数量多,单台装备消耗摩托小时少,就会使更少装备的摩托小时储备低于战备储备标准。

2)优先动用摩托小时储备少的装备。如表 2

所示,当战备储备达标率取得极大值 0.757 5 时,摩托小时初始储备少,即在 0 ~ 100、101 ~ 200、201 ~ 300 之间的装备全部动用,消耗完摩托小时储备而实施大、中修装备数量最多为 32,生产新的摩托小时。

3)使装备在本年度完成预防性维修。如图 10 所示,战备储备达标率随跨年度维修比率增加呈明显下降趋势;如表 2 所示,在装备战备储备达标率取得极大值 0.757 5 时,跨年度维修期比率为最小值 0.181 8,装备预防性维修开始情况如图 13 所示,大部分在年内完成。

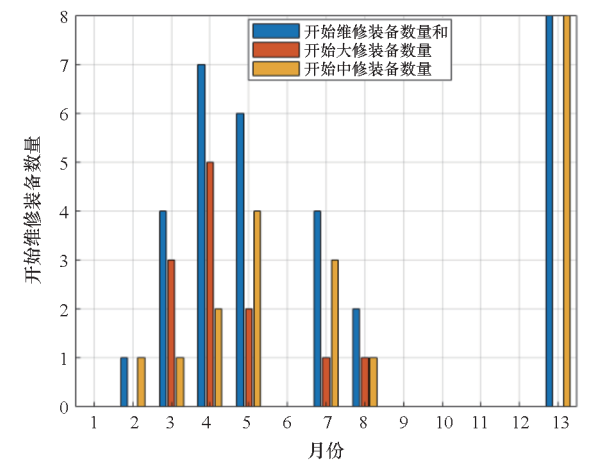


图 13 战备储备达标率取得极值时各月开始预防性维修装备数量
Fig. 13 Monthly number of starting preventive maintenance when motor hours reserve compliance rate reaches the extreme value

4)年初集中动用装备。在战备储备达标率取得极大值 0.757 5 时,动用装备数量、动用装备摩托小时集中在年初,如图 14、图 15 所示,使得更多的装备预防性维修在年内完成,生产更多摩托小时。

5.3.3 偏重维修费用的装备动用优化策略

1)减少大修装备数量。如表 2 所示,当维修费用取得极小值 595.260 7 时,大修装备数量取得最小值 0,可见大修费用对于维修费用影响较大。

2)优先动用未经中修的装备。多动用已中修装备,会增加大修装备数量,进而增加维修费用,如图 9 所示,维修费用随动用已中修、未中修装备比率增加呈明显上升趋势;如表 2 所示,在维修费用取得极小值 595.260 7 时,动用已中修、未中修装备比率较小为 0.777 8,动用装备数量、动用装备摩托小时情况,如图 16、图 17 所示,动用未中修装备比例更大。

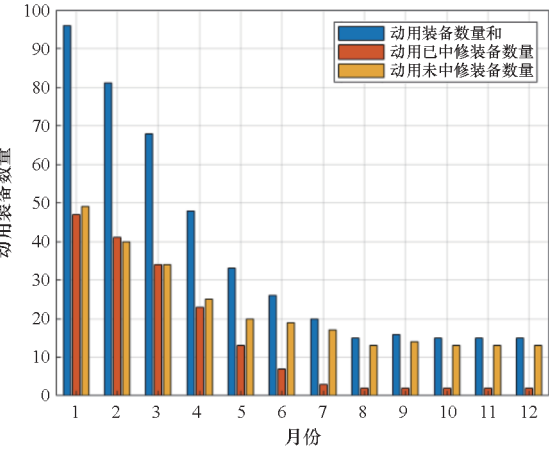


图 14 战备储备达标率取得极值时各月动用装备数量
Fig. 14 Monthly number of deployed equipment when motor hours reserve compliance rate reaches the extreme value

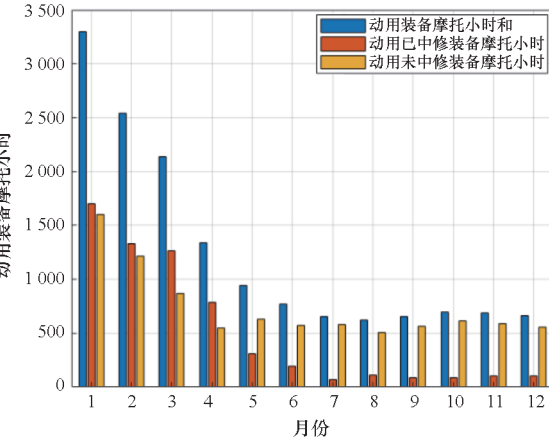


图 15 战备储备达标率取得极值时各月动用摩托小时
Fig. 15 Monthly deployed equipment motor hours when motor hours reserve compliance rate reaches the extreme value

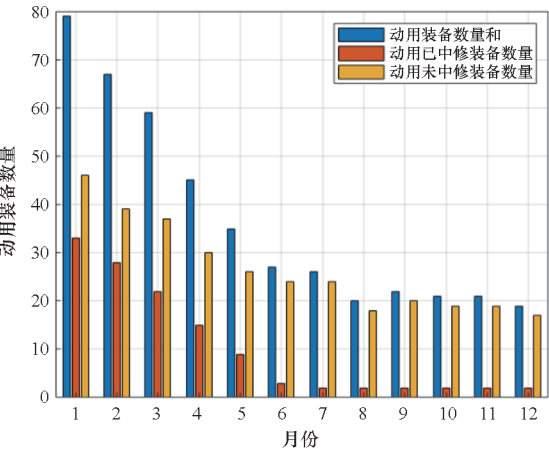


图 16 维修费用取得极值时各月动用装备数量
Fig. 16 Monthly number of deployed equipment when motor maintenance costs reaches the extreme value

5.3.4 偏重完好率的装备动用优化策略

如图 7~10 所示,完好率随 4 个指标变化曲

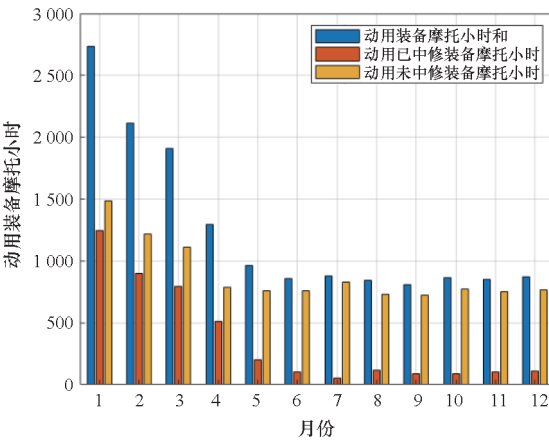


图 17 维修费用取得极值时各月动用装备摩托小时
Fig. 17 Monthly deployed equipment motor hours when motor maintenance costs reaches the extreme value

线与在位率的变化曲线基本相似;如表 2 所示,当完好率取得极大值 0.933 3 时,在位率取得极大值 1,偏重完好率的装备动用优化策略与偏重在位率的装备动用优化策略相同。

6 结论

本文在分析装备动用与维修关系基础上,结合部队战备训练需求,综合考虑预防性维修和修复性维修类型,建立以装备在位率最大、装备战备储备达标率最大、装备完好率最大以及装备维修费用最小为目标,以摩托小时收支平衡为约束的多目标优化模型。根据所建立模型目标高维、尺度差异大的特性,在传统 NSGA-III 算法的基础上,提出基于 DNA 结构的种群个体交叉、变异进化操作方法,设计自适应归一化方法对目标函数进行归一化处理,在高维多目标优化问题中表现出色,收敛性和寻优性明显增强,为装备动用提供了多个平衡的方案。根据仿真计算结果,通过对装备动用方案各目标函数的趋势分析和极值分析,提出了不同偏好的装备动用优化策略。研究成果对于指导部队科学合理动用装备,提高装备动用效益和维修效率具有重要的实践意义。下一步,将在预防性维修影响因素分析、多年度分析装备动用等方面进一步深入研究。

参考文献(References)

[1] 徐龙堂,付昭旺,常颖,等. 装甲车辆顶部防护需求及对策分析[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(11): 16-21. XU L T, FU Z W, CHANG Y, et al. Analysis on protection demand and countermeasures for the top of armored vehicle[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2018, 39(11): 16-21. (in Chinese)

- [2] 时昌明. 装甲装备维修计划管理决策技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.
SHI C M. Research on maintenance planning decision-making of armored vehicles[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010.
- [3] 周云彦, 王建平, 赵聪, 等. 一种装甲装备摩托小时梯次储备的生成与控制方法[J]. 装甲兵工程学院学报, 2012(5): 24–28.
ZHOU Y Y, WANG J P, ZHAO C, et al. Formation and control method of motor hour echelon storage for a kind of armored equipment[J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2012(5): 24–28. (in Chinese)
- [4] 梅国建, 张向波, 周欣. 基于全系统全寿命理论的装甲装备退役动用决策模型[J]. 装备指挥技术学院学报, 2009, 20(4): 113–115.
MEI G J, ZHANG X B, ZHOU X. Operation model of aged equipment based on total system and total life theory[J]. Journal of the Academy of Equipment Command & Technology, 2009, 20(4): 113–115. (in Chinese)
- [5] 孟庆均, 郭齐胜, 曹玉坤, 等. 装备在役考核评估指标体系[J]. 装甲兵工程学院学报, 2018(1): 18–24.
MENG Q J, GUO Q S, CAO Y K, et al. Evaluation indicators system of equipment assessment in service[J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2018(1): 18–24. (in Chinese)
- [6] 曹军海, 郑竣兮, 杜海东, 等. 基于 OOPN 的装备动用业务流程建模与仿真[J]. 指挥控制与仿真, 2019, 41(6): 102–108.
CAO J H, ZHENG J X, DU H D, et al. Modeling and simulation of equipment utilization business process based on OOPN[J]. Command Control & Simulation, 2019, 41(6): 102–108. (in Chinese)
- [7] 李羚玮, 王兵, 曹军海, 等. 基于仿真的装备动用与保障效能评估[J]. 系统仿真学报, 2019, 31(9): 1747–1754.
LI L W, WANG B, CAO J H, et al. Equipment assignment and supporting efficiency evaluation based on simulation[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(9): 1747–1754. (in Chinese)
- [8] 蔡赛男. 装备维修保障任务分析与预测方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.
CAI S N. Research on equipment maintenance support task analysis and prediction method [D]. Xi'an: Xidian University, 2021. (in Chinese)
- [9] 李东京, 王兵, 秦智勇. 基于多 Agent 的装甲装备动用与维修保障过程仿真[J]. 火力与指挥控制, 2023, 48(5): 103–109.
LI D J, WANG B, QIN Z Y. Simulation of armored equipment employment and maintenance support process based on multi-agent[J]. Fire Control & Command Control, 2023, 48(5): 103–109. (in Chinese)
- [10] ASAFUDDOULA M, SINGH H K, RAY T. An enhanced decomposition-based evolutionary algorithm with adaptive reference vectors[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2018, 48(8): 2321–2334.
- [11] CHAI Z Y, YANG C D, LI Y L. Communication efficiency optimization in federated learning based on multi-objective evolutionary algorithm[J]. Evolutionary Intelligence, 2023, 16(3): 1033–1044.
- [12] ZHANG H J, WANG G G, DONG J Y, et al. Improved NSGA-III with second-order difference random strategy for dynamic multi-objective optimization[J]. Processes, 2021, 9(6): 911.
- [13] 于春风, 李江, 王建荣. 深化装甲装备维修保障改革研究[J]. 装备学院学报, 2013, 24(4): 38–41.
YU C F, LI J, WANG J R. Research on reform of maintenance support for armored equipment[J]. Journal of Academy of Equipment, 2013, 24(4): 38–41. (in Chinese)
- [14] 梁佩, 邱浩波, 孟磊, 等. 随机环境下设备关键部件多目标分阶段顺序维修模型与方法[J]. 计算机集成制造系统, 2025, 31(4): 1346–1357.
LIANG P, QIU H B, MENG L, et al. Model and algorithm of key part multi-objective phased sequential preventive maintenance problems for equipment under stochasticity[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2025, 31(4): 1346–1357. (in Chinese)
- [15] DEB K, JAIN H. An evolutionary many-objective optimization algorithm using reference-point-based nondominated sorting approach, part I: solving problems with box constraints[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2014, 18(4): 577–601.
- [16] CUI S, PAN W S, LIANG J, et al. Addressing algorithmic disparity and performance inconsistency in federated learning[C]// Proceedings of 35th Conference on Neural Information Processing Systems, 2021.
- [17] SUN X D, XU N X, YAO M. Sequential subspace optimization design of a dual three-phase permanent magnet synchronous hub motor based on NSGA III [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2023, 9(1): 622–630.
- [18] ZHANG X, CHEN H. An improved NSGA-III integrating a good point set for multi-objective optimal design of power inductors[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2024, 46(10): 586.
- [19] 袁源. 基于分解的多目标进化算法及其应用[D]. 北京: 清华大学, 2015.
YUAN Y. Decomposition-based multi-objective evolutionary algorithms and their applications [D]. Beijing: Tsinghua University, 2015. (in Chinese)