

装备战时基地级维修作业分工优化^①

凌海风, 张 军, 张 洋, 彭永飞

(中国人民解放军理工大学 军事装备学, 南京 210007)

摘 要: 为快速完成装备修理任务, 根据装备战时基地级维修的特点, 提出了战时基地级装备维修作业分工的数学模型, 在多工种多任务维修作业分工问题的基础上给出了带时间窗口的维修作业分工问题求解方案. 根据该作业分工模型, 利用遗传算法的特性, 将问题背景与算法相融合, 运用实例进行试验及分析. 试验结果表明, 本文提出的方法能有效地解决装备战时基地级维修作业分工优化问题.

关键词: 装备维修; 时间窗口; 分工优化

Equipment in Wartime Depot-Level Maintenance Operations Optimization of Division of Labour

LING Hai-Feng, ZHANG Jun, ZHANG Yang, PENG Yong-Fei

(School of Military Equipment, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

Abstract: In order to accomplish the task of the equipment repair, according to the distinguishing of depot-level maintenance of equipment in war, this paper proposes a mathematical model of the division of operations in wartime equipment maintenance. Based on many types of multi task repair operations division, it puts forwards repair operations division problem solving scheme with time window. According to the model, using the characteristics of genetic algorithm, integrating the background of the problem and algorithm, this paper tests and analyzes an instance. The results show that the proposed method can effectively solve the wartime maintenance operations and division of optimization problems.

Key words: equipment maintenance; time window; optimization division

在遂行作战或应急保障任务时, 很多装备需要送到固定的修理基地进行维修. 在修理基地, 受损装备的维修会被按照不同的工种划分出多个子维修任务, 由各专业维修小组承担. 当修理基地涉及到多台装备的维修时, 就需要为不同工种的各小组分派维修任务, 确定各装备每个工种的维修工序, 在这个过程中, 就涉及到维修作业分工优化问题. 进行此类问题的研究较多^[1-9], 例如单专业多任务作业分工问题研究^[3], 多专业多工种作业分工问题的研究^[4,5], 强调维修效能评估方面的研究^[6-8], 以及强调工序方面问题的研究^[9]等. 这些问题的研究推进了运筹学在装备维修方面的应用, 为装备维修效能的提高作出了重要贡献. 但研

究背景都对维修时间作了完全限定, 只要求整体完成时间最短. 而实际情况可能会出现在保证整个维修任务的效率的情况下, 对某几台装备有明确的时间要求. 研究此类问题即带有时间窗口限制的装备维修作业分工优化问题的文章很少.

遗传算法是一类借鉴生物界自然选择和自然遗传机制的高度并行、随机、自适应搜索算法^[10]. 它的主要特点是群体搜索的策略和群体中个体之间信息的交换, 搜索本身不依赖于梯度信息. 遗传算法在各个领域都得到了广泛的应用, 特别是针对离散问题, 其特有的模仿生物遗传基因的特色可以发挥出更加好的效用. 本文运用了遗传算法对模型进行求解, 设计了相

^① 收稿时间:2014-02-10;收到修改稿时间:2014-03-26

应的算法规则,保证了求解的效率及其良好的收敛性.

1 维修作业分工优化模型

1.1 装备战时基地级维修作业分工优化问题描述

后送至修理基地的受损装备,一般为重损装备,需要多个维修小组进行不同工种的维修作业,修理工序多、任务重,而且时间紧,指挥部门需要给出合理的作业分工方案,安排各维修小组的维修任务、制定各装备的修理工序和各维修小组的作业顺序,以提高作业效率,在最短时间内完成所有任务.这个问题可看作是车间作业调度与作业工序优化问题的结合体,是一个典型的 NP 问题,传统的求解方法难于求解.我们将讨论用智能优化算法求解装备战时基地级维修作业分工问题,最终给出各维修小组的具体作业方案.

1.2 数学模型的建立

下面首先介绍基地级维修作业分工优化问题的若干符号.假设维修任务集 $J=\{1,2,\dots,n\}$ 表示某一时刻共接到 n 台受损装备的维修任务;维修工种集 $M=\{1,2,\dots,m\}$ 表示基地将装备的维修作业分为 m 个工种; $S=\{1,2,\dots,s\}$ 表示将设 s 个维修小组;矩阵 R 表示各维修工种对应的维修小组情况,设各工种最多配备 k 个维修小组,当某个工种的维修小组少于 k 个时,用 0 补全矩阵;假设各维修小组由于其技术能力水平的差异,其对各损坏装备的维修作业时间各不相同,不同工种的不同维修小组对每台送修装备的装备维修时间可用 3 维矩阵 T 表示,若某台装备不需要某工种进行维修作业,则令该工种的所有维修小组对该装备的维修作业时间为 0.为不失一般性,我们还假设每台装备针对某工种的维修作业都只安排一个该工种的维修小组,并假设针对任一维修作业,基地的维修设施设备足以满足任意多的装备并行修理的需要.

根据以上条件,最优维修作业分配方案要求所有维修任务能够尽快完成,使整个维修任务完成时间最短,每个方案需要明确各装备各工种的维修顺序、各装备各工种的承修小组和各个维修小组的工作次序.此问题的数学表达非常简单,设 $T_z(i)$ 为第 $i(i \in [1,n])$ 台装备的维修完成时间,则该问题的数学模型可表达为:

$$\min f = \max_{i \in [1,n]} (T_z(i)) \quad (1)$$

装备战时基地级维修作业分工优化是一个典型的 COP 问题^[1],解决这类问题的一个重要思路是运用智

能算法求解,而遗传算法适用于求解传统搜索方法难以解决的非线性组合优化问题.基于此,我们选用遗传算法来求解装备战时基地级维修作业分工优化问题.

2 算法规则及流程

2.1 染色体的编码

针对维修作业分工优化问题,我们选择一种基于整数编码方式的多层编码方案.对于 n 台装备 m 个工种的维修作业分工问题,对应的编码是一个长度为 $3*m*n$ 的向量 P ,这个向量由两部分组成,前 $m*n$ 个元素表示的是整个维修作业的次序,用向量 P_v 表示,向量元素为 $1 \sim n$ 之间的整数,为待修装备的代号,每个数值出现 m 次,代表其由不同的维修小组进行了 m 道工序的维修.后面的个元素由矩阵 P_r 转化而来,矩阵的每一行有 $2m$ 个元素,所在的行数表示对应的装备代号,前 m 个元素表示该装备的修理工序,用 $1 \sim m$ 之间的整数表示,后 m 个元素表示相对应的维修小组的代号.

通过这样的编码方式,可以将各个维修小组的维修方案都表示出来.在 P_v 和 P_r 都编码完成后,将其整合成一个总的向量 P ,具体方法是将 P_r 的各行按 $1 \sim n$ 的顺序依次连接,得到一个 $2*m*n$ 的向量 P_r ,再与 P_v 连接,从而得到最终的向量 P .

2.2 种群初始化

遗传算法可以执行下去的前提是所有染色体代表的解必须是可行解.因此,在产生初始种群时,也必须达到这个要求.从上文中的编码方案可知编码分为两部分,因此,种群初始化时,种群大小设为 N ,也可以分成 P_v 、 P_r 两部分进行初始化.

2.3 适应度值计算

在进行选择操作之前,需要对所有染色体进行适应度值计算,为选择操作提供依据.在这里讨论以下两种情况:

1) 在对某些装备返回战场时间没有特殊要求的情况下,适应度值可定义为完成所有装备维修任务的时间,则适应度函数可表示为:

$$fitness = \max (T_z(i)), \quad i \in [1,n] \quad (2)$$

其中 $T_z(i)$ 为第 i 台装备完成维修的时间.

2) 决策人员在进行战时基地级维修作业分工优化的时候,另一种典型的情况是某台装备或者某几台装

备的维修完成时间有明确的时间限制,要求在某个规定时间内完成,也就是所谓的时间窗口(Time Window).针对这种情况,可以将这个时间约束以惩罚函数的形式并入到适应度函数中,然后再进行计算.例如,要求装备 i 在 T_i 时间内完成,则我们可以将适应度函数改为:

$$fitness = \max(T_z(i)) + (\max(T_z(i), T_i) - T_i) * 10^5 \quad (3)$$

其中, $(\max(t_z(i), T_i) - T_i) * 10^5$ 为惩罚函数,当装备 i 的实际维修完成时间超过 T_i 时,在惩罚函数的影响下, $fitness$ 的值就会变得非常大,使之不会成为最优,这样的染色体在选择中就会被淘汰.

2.4 选择

选择^[12,13]操作对于种群从一代更新到下一代起着重要的作用.这里根据模型特点提出一种选择方案:在初始化结束和交叉、变异运算结束后,对所有父代和子代染色体进行适应度值计算,而后按照适应度值对所有染色体进行排序,预先设定一个选优概率为 P_x ,如果种群大小为 N ,则首先选中排序结果中的前 $N * P_x$ 个染色体,然后再从剩下的染色体中随机选择 $(N - N * P_x)$ 个染色体,由这些染色体合在一起组成新一代的种群.这样的选择方案,既充分发挥了遗传学中“优胜劣汰”的原则,又保持了“生物多样性”,以避免算法局部收敛.

2.5 交叉

交叉时,以一定的交叉概率按照轮盘赌策略选择父代染色体.在具体执行交叉时,依然分 P_v 和 P_r 两个部分进行.在交叉函数中,将两个编码向量 P_1 和 P_2 按编码整合的相反策略拆分为 P_{v1} 、 P_{v2} 和 P_{r1} 、 P_{r2} ,分别进行交叉运算.

交叉方法使用整数交叉,方式为两点交叉的方式,即随机选择一个起始位置和一个结束位置,将 P_{v1} 和 P_{v2} 相应位置间的数值进行互换,完成交叉操作.在交叉结束后,会出现这样一种情况,交叉前染色体中各基因的数量和交叉后的不尽相同.某些装备代号多余,某些缺失,需要对染色体进行检查和调整,将多余的基因变成缺失的基因.例如,有染色体 P_{v1} 和 P_{v2} 如下:

$$\begin{matrix} P_{v1}: & 3 & 3 & 2 & 4 & 4 & 2 & 1 & 1 \\ P_{v2}: & 4 & 2 & 3 & 2 & 1 & 3 & 4 & 1 \end{matrix}$$

选择第 5 位到第 7 位进行交叉,交叉后得到 P_{v1}^1 和 P_{v2}^1 ,此时就会发现需要将交叉后的 P_{v1}^1 逐位地与交

叉前的 P_{v2} 进行比较,当 P_{v1}^1 中的某一位上的代码与 P_{v2} 中相同时,将这两个代码都变为 0.整个对比完成后,两个染色体变为:

$$\begin{matrix} PP_{v1}^1: & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 \\ PP_{v2}: & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix}$$

依次将 P_{v1}^1 中与 PP_{v1}^1 中的非 0 代码相同位置上的代码用 PP_{v2} 中的非 0 代码替换,完成两者交叉运算.

对 P_{v2}^1 进行同样的操作,完成了一对染色体的交叉运算.例子中的染色体 P_{v1} 和 P_{v2} 交叉运算的结果最终为:

$$\begin{matrix} P_{v1}^1: & 3 & 3 & 2 & 4 & 1 & 3 & 2 & 1 \\ P_{v2}^1: & 4 & 2 & 3 & 3 & 4 & 2 & 1 & 1 \end{matrix}$$

P_{r1} 、 P_{r2} 的交叉算法为随机从 P_{r1} 中取 $k(k \leq n)$ 个行向量,每一行向量与 P_{r2} 中相对应的行向量进行交叉,交叉时,只在行向量的前 m 维中发生交叉,方法与 P_{v1} 、 P_{v2} 的交叉算法相同,但不同的是,此外,后面 m 维向量也要进行操作,原则是:第 $i(i \leq m)$ 维向量进行交叉或者替换,对应第 $m+i$ 维向量进行交叉或者替换.

2.6 变异

变异操作时,同样分成 P_v 和 P_r 两个部分进行.以一定的变异概率按照轮盘赌策略从交叉后产生的子代染色体中选择一个染色体,分解成 P_v 和 P_r 两个部分.针对 P_v 部分的变异为随机取出其中的两位,交换其位置上的代码.针对 P_r 部分的变异为随机取矩阵中的一个行向量,在前 m 维中取两位,交换其位置上的代码,同时对应的后 m 维的位置上也进行相应的操作,前 m 维与后 m 维的对应关系与交叉中的相同.

2.7 算法流程

整个遗传算法的算法步骤如下:

- Step1: 按照编码规则产生初始种群;
- Step2: 对种群中的各个染色体进行适应度值计算;
- Step3: 按适应度值对临时种群进行由小到大的排序;
- Step4: 进行选择操作,得到新的种群;
- Step5: 按照一定的交叉概率进行交叉操作;
- Step6: 按照一定的变异概率进行变异操作;
- Step7: 将子代染色体与父代染色体进行合并,得到一个临时种群;
- Step8: 判断算法是否结束,如果没有,则返回到 step2 继续计算,否则,输出适应度值最优的计算结果.

3 实验与分析

以战时某维修基地共接到 7 台装备的维修任务为例, 装备基地将整个维修作业划分为机械传动、发动机、液压系统、工作装置、电气设备等 5 个工种, 共设置了 9 个维修小组. 各维修小组对应的工种如表 3-2 所示, 对应各台装备的抢修时间如表 3-3 所示. 要求制订合理的作业分工方案, 使得所有任务能在最短时间内完成.

表 1 各维修小组对应工种

工种	编号	维修小组
发动机	1	1、2
机械传动	2	3、4
电气设备	3	5
工作装置	4	6、7
液压系统	5	8、9

表 2 装备维修时间表(单位: 小时)

工种	装备 1	装备 2	装备 3	装备 4	装备 5	装备 6	装备 7
发动机	4, 3.5	5, 4.5	3, 3	4.5, 5	4, 4	6, 5	4, 4.5
机械传动	4, 3	3, 3	4, 3.5	3, 3	2.5, 3	5, 4	4, 4.5
电气设备	3	2	3	2	1.5	4	2.5
工作装置	3, 4	2, 2.5	3, 3	3, 2	3.5, 3	2, 2	4, 3.5
液压系统	5, 4	6, 4	4, 4	4, 4.5	5, 6	4, 3	4.5, 5.5

用遗传算法计算, 种群大小取 1000, 交叉概率取 0.8, 变异概率取 0.15, 选优概率取 0.75, 迭代次数设为 400, 得到的优化结果任务完成时间为 19.5. 迭代过程中最优值的收敛过程如图 1 所示, 不带时间窗口的方案实施时间分布情况用甘特图表示为图 2 所示.

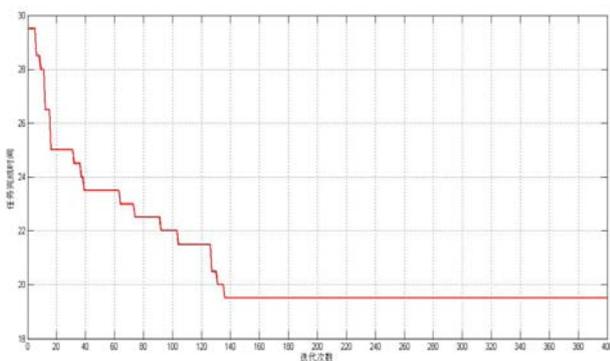


图 1 目标值收敛情况图

针对方案的内容要求, 最终的方案描述以甘特图的形式出现, 明确表示出各维修小组的作业开展情况.

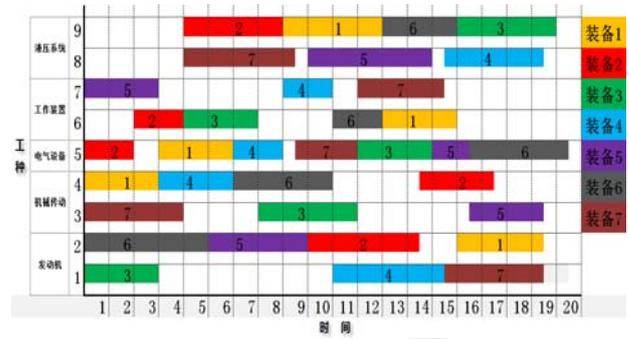


图 2 维修小组作业方案甘特图(不带时间窗口)

假设备 3 要求在 17 个工时内完成, 遗传算法的其它各项参数保持不变, 经计算, 得到作业实施的时间分布如图 3 所示.

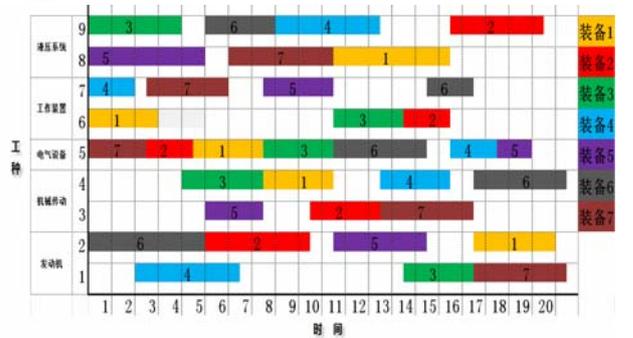


图 3 维修小组作业方案甘特图(带时间窗口)

从图 1 可以看到, 问题求解过程中收敛速度比较快, 在 130 代左右时, 就已经收敛到了最优解. 可以看出此方案的收敛性较好, 从图 2 可以看到, 方案的安排比较紧凑, 任务分配比较平均, 分析小组 5 的维修方案, 由于其单独承担了液压系统的维修, 其维修方案更具可比性, 从图 2 可知, 在整个维修期间, 小组 5 只有 1.5 小时的间歇期, 其工作效率还是相当高的, 所以, 该方案可以认为是一个较为合理的方案. 从图 3 可以知, 装备 3 的维修完成时间为 16.5 小时, 符合要求. 对比图 2 与图 3 可知在整体维修时间没有增加的情况下满足了个体对时间的需求, 保证了维修作业的效率.

4 结语

为装备尽快恢复战斗力, 保障战时基地及时完成任务, 本文研究了装备战时基地级维修作业分工优化问题, 解决了在对维修装备有时间窗口约束的情况下, 实现快速恢复各装备战斗力的问题, 对提高部队战斗

力具有重要的意义。

参考文献

- 1 Lee LH, Chew EP, Teng S, et al. Multi-objective simulationbased evolutionary algorithm for an aircraft spare parts allocation problem. *European Journal of Operational Research*, 2008, 189(21): 476–491.
- 2 Mytakidis T, Vlachos A. Maintenance scheduling by using the bi-criterion algorithm of preferential antipheromone. *Leonardo Journal of Sciences*, 2008, 12(16): 143–164.
- 3 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. *系统工程与电子技术*, 2008, 30(7): 1366–1369.
- 4 万明, 张凤鸣, 樊晓光. 战时装备维修任务调度的两种新算法. *系统工程与电子技术*, 2012, 34(1): 107–110.
- 5 朱昱, 王连锋, 杨雪松, 等. 一种基于维修流程的装备维修任务调度方法. *兵工自动化*, 2012, 31(12): 28–32.
- 6 张子丘, 郑宇军. 装备维修规划的多目标优化模型和求解算法. *计算机集成制造系统*, 2010, 16(10): 2174–2180.
- 7 Cline R. Maintenance scheduling for mechanical equipment. United States Department of the Interior Bureau of Reclamation, Denver, Colorado. <http://www.usbr.gov/power/data/fist/fist4-1a/41A.pdf>.
- 8 Cline R. Maintenance scheduling for electrical equipment. United states department of the interior bureau of reclamation, Denver, Colorado. http://www.usbr.gov/power/data/fist/fist4_lb/fist4_lb_dec2005.pdf.
- 9 刘文宝, 王少华, 孟祥辉, 等. 基于遗传算法的装备维修任务规划. *兵工自动化*, 2010, 29(11): 23–26.
- 10 Holland J. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. University of Michigan Press. Ann Arbor, MI, 1975. MIT Press, Cambridge, MA. 1992.
- 11 玄光男, 程润伟. *遗传算法与工程优化*. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- 12 陈有青, 徐蔡星, 等. 一种改进选择算子的遗传算法. *计算机工程与应用*, 2008, 44(2): 44–49.
- 13 Liang HQ, Gui JZ. Genetic Algorithm with selective Generation. The 2nd Asia Pacific Conf. on Genetic Algorithms and Applications (APGA'2000). HongKong. May 3-5, 2000.