

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2012.12.009

一种基于维修流程的装备维修任务调度方法

朱昱, 王连锋, 杨雪松, 赵久奋
(第二炮兵工程大学 906 室, 西安 710025)

摘要: 为了快速、有效地进行战时装备修理任务调度, 减少故障装备在维修系统的等待时间, 尽快恢复部队的战斗力, 提出一种串行维修流程的多专业多作战单元维修任务调度的数学描述和模型。分析基于维修流程的装备维修任务调度问题, 描述串行同顺序维修流程任务调度问题, 给出求解维修调度的混合遗传算法, 并以实例对算法的时间效率和优化结果进行仿真实验。仿真实验结果表明, 该方法能有效解决一种战时维修任务调度问题。

关键词: 维修任务; 优化调度; 混合遗传算法

中图分类号: TJ07 **文献标志码:** A

A Tasks Scheduling Model of Armament Maintenance Based on the Maintenance Flow

Zhu Yu, Wang Lianfeng, Yang Xuesong, Zhao Jiufen
(No. 906 Staff Room, Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China)

Abstract: In order to implement armament maintenance task scheduling quickly and effectively, reduce waiting time of armament in maintenance systems, and resume battle effectiveness as soon as possible, a general mathematical description and relative model of serial maintenance flow with multi-specialty and multi-combat-unit maintenance task scheduling are put forward. Based on maintenance flow, the armament maintenance task scheduling problem with serial flow and same order is expatiated and a hybrid genetic algorithm is presented to solve such problem. Experiments are carried out, and simulation results show that the method is effective to solve maintenance task scheduling problems in wartime.

Key words: maintenance task; optimization scheduling; updated genetic algorithm

0 引言

装备维修任务调度工作是信息化作战条件下制约装备维修保障工作效率的瓶颈, 按照先到先服务规则调度维修任务很难满足现代作战需求。近年来, 运用现代管理的理论和方法对装备维修优化调度展开了较为广泛的研究, 并取得了许多成果^[1-7]。这些研究主要存在以下问题: 1) 大多以单个故障装备为研究对象, 没有考虑作战装备的整体性。而武器装备的使用与维修保障具有与独立装备所不同的诸多特点。2) 基于故障装备的全部维修工作大多都由某一维修小组来完成这种简单维修组织实施方法下的调度。而在武器装备维修保障中, 根据维修机构的规模大小、不同级别所采用的维修组织实施方法是不同且多样的。有些维修组织实施方法需要考虑武器装备的专业, 有些可以不考虑专业, 还有些既需要考虑武器装备专业, 又需要考虑维修业务流程。这使得单纯考虑独立的多台故障装备和唯一的修理组织实施方法难以得到较好的维修方案, 影响了决策的准确性。笔者以满足武器装备体系对抗作战任务保障需求为目标, 把作战单元的故障装备作为一

个整体, 提出一种基于串行维修流程的多专业多作战单元维修任务调度问题的数学描述和模型, 给出求解该问题的混合遗传算法。

1 基于维修流程的装备维修任务调度分析

装备维修任务调度问题中的维修流程是指: 装备维修保障系统中的故障装备必须按照预先规定的维修业务流程进行维修, 否则维修的装备不能满足要求, 甚至不能进行下一步的维修。维修业务流程规定了维修任务的作业顺序, 同时规定了维修任务要访问的维修小组, 因为任何一个确定的维修作业(工序)只能在某个确定的维修小组或维修小组群内维修, 确定故障装备的维修流程一般是固定的。因此, 基于维修业务流程的装备维修任务调度是对维修实施过程的故障装备维修作业计划的加工顺序进行合理排序, 确保维修过程的实施。

从时间来看, 装备维修实施过程表现为一系列维修任务的并行、串行和交叉耦合, 故障装备维修作业^[6]可分为:

1) 并行维修作业。各项维修作业同时展开, 没有前后约束。

收稿日期: 2012-08-06; 修回日期: 2012-09-24

基金项目: 国防预研基金项目(9140A27040311JB47)

作者简介: 朱昱(1969—), 女, 湖南人, 博士, 副教授, 从事信息系统分析、装备维修保障研究。

2) 串行维修作业。前项维修作业完成后, 才能进行后继项维修作业, 如对维修任务进行故障鉴别、故障定位、获取备件、排除故障等维修活动就可以看作维修流程是串行的, 因为各项维修作业必须一环扣一环, 不能交叉进行。

3) 混合维修作业。维修作业既有串行维修作业又有并行维修作业, 交叉耦合。

根据维修流程的特点, 把基于维修流程的装备维修任务调度问题分为:

1) 并行流程维修任务调度问题。对多作战单元多专业具有并行维修作业的故障装备进行调度。

2) 串行流程维修任务调度问题。对多作战单元多专业具有串行维修作业的故障装备进行调度。如果每个维修任务的维修流程相同, 可称串行同顺序维修任务调度。

3) 混合流程维修任务调度问题。对多作战单元多专业具有混合维修作业的故障装备进行调度。

基于维修流程的装备维修任务调度问题比不考虑维修流程的装备维修任务调度问题更具复杂性, 因不仅要考虑多个参战作战单元形成整体战斗力, 还要安排多个不同专业故障装备的多个维修步骤(作业)的顺序、面临维修小组的选择问题, 如图1。



图1 n个作战单元故障装备分属于L个专业

笔者研究的是多专业多作战单元串行同顺序维修任务调度问题, 同时假设约定故障装备在其专业领域内每个维修小组上维修一次, 不中断; 维修小组在某一时刻只能够维修一个故障装备; 故障装备维修步骤所需时间和准备时间已知。

2 串行同顺序维修流程任务调度问题描述

设有 n 个作战单元的故障装备分属于 L 个专业领域, 每个领域的维修小组共有 m_l 个, 作战单元 i 有 s_{il} 台装备故障属于第 $l(l=1, \dots, L)$ 个专业, 故障装备 $N_{ijl}(i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, \sum_{l=1}^L s_{il}, l=1, 2, \dots, L)$

需要 m_l 个维修小组依次维修, 维修步骤编号为 $N_{ijkl}(i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, s_{il}; l=1, 2, \dots, L; k=1, 2, \dots, m_l)$ 所需维修时间为 t_{ijkl} , 由维修小组 $x_{ijl}(x_{ijl}=1, \dots, m_l)$ 负责维修, 确定各作战单元的维修任务调度方案, 要使战斗力最快得到恢复。调度问题如图2所示。

因为每个故障装备维修步骤约束给定, 同专业所有故障装备在各维修小组的维修顺序相同; 因此

只需要确定各专业故障装备的维修顺序, 就可以确定故障装备维修步骤的排列顺序。从而确定作战单元在各专业上的修复时间。

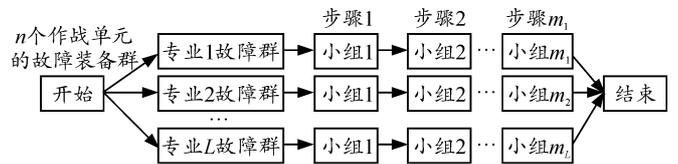


图2 串行同顺序流程调度问题图示

设 C_{il} 表示作战单元 i 在专业 l 的修复时间(即作战单元 i 在专业 l 的全部战损装备修理完工的最终时间)。

假设专业 l 故障装备群按照 1 至 m_l 小组的顺序维修, $\{p_{1l}, p_{2l}, \dots, p_{s_{il}}\}(s = \sum_{i=1}^n s_{il})$ 表示专业 l 故障装备群的调度顺序, 令 $c(p_{rl}, k)$ 表示故障装备 p_{rl} 在维修小组 $k(k=1, 2, \dots, m_l)$ 上的修复时间, $t_{p_{rl}, k}$ 为装备 p_{rl} 在维修小组 k 上的维修时间。则

$$c(p_{1l}, 1) = t_{p_{1l}, 1} \quad (1)$$

$$c(p_{1l}, k) = c(p_{1l}, k-1) + t_{p_{1l}, k} \quad (k = 2, \dots, m_l) \quad (2)$$

$$c(p_{r,l}, 1) = c(p_{r-1,l}, 1) + t_{p_{r,l}, 1} \quad (r = 2, \dots, s) \quad (3)$$

$$c(p_{r,l}, k) = \max\{c(p_{r-1,l}, k), c(p_{r,l}, k-1)\} + t_{p_{r,l}, k} \quad (r = 2, \dots, s; k = 2, \dots, m_l) \quad (4)$$

作战单元 i 在专业 l 的修复时间为:

$$C_{il} = \max_{r \in Q_i} c(p_{rl}, m_l) \quad (Q_i \subset \{N_{ijl}\}) \quad (5)$$

$$C_{i \max} = \max_{1 \leq i \leq L} C_{il} \quad (6)$$

问题的调度目标为

$$\min \sum_{i=1}^n C_{i \max} \quad (7)$$

例如: 分属 3 个专业的 3 个作战单元故障装备修复时间, 如图3所示。

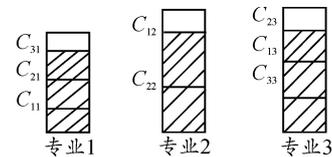


图3 修复时间图示

从图3中可知: 作战单元1的最大修复时间 $C_{1 \max}$ 为 C_{12} , 作战单元2最大修复时间 $C_{2 \max}$ 为 C_{23} , 作战单元3的最大修复时间 $C_{3 \max}$ 为 C_{31} 。调度目标为 $\min(C_{12} + C_{23} + C_{31})$ 。

3 调度算法

1) 算法分析。

串行同顺序维修任务调度问题中单一专业故障

装备群的调度与制造系统中流水作业调度问题 (Flow-shop) 类似, Flow-shop 是一个典型的 NP-hard 问题, 文中问题也是一个 NP-hard 问题。解决 Flow-shop 问题, 现有的启发式方法可分为规则式算法和迭代式算法 2 类。常用简单优先权规则主要有: 处理时间短 (SPT)、处理时间长 (LPT), 剩余工序加工时间最短 (SR)、剩余工序加工时间最长 (LR) 等。而迭代式启发式算法主要有 NEH 方法、WYS 方法、遗传算法、模拟退火等, 其中 NEH 法被认为是至今最好的多项式构造型算法, 这类算法能快速构造解, 但通常解的质量和算法通用性较差。因为该问题是新问题, 没有解决的算法, 笔者对 NEH 算法进行了改进, 可应用到串行同顺序维修任务调度问题。

改进的 NEH 算法步骤如下:

步骤 1: 计算每一个故障装备维修所需的总时间 $T_{ijl} = \sum_{k=1}^m t_{ijkl}$ 。

步骤 2: 在专业 $l(l=1,2,\dots,L)$ 内按 T_{ijl} 递增顺序排列所有故障装备, 得到初始解 (序列) P 。

步骤 3: 令 $l=1$ 。

步骤 4: 选出初始解中第 1、2 个装备, 分别计算这 2 个装备的 2 种排序下作战单元所需维修时间 $C_{i\max}(i=1,2,\dots,n)$, 取 $\sum_{i=1}^n C_{i\max}$ 小的排列, 将这 2 个装备的相对位置固定下来, 放入序列 Q 中; 令 $k=3$ 。

步骤 5: 从序列 P 中选出第 k 位的装备, 将其插入到序列 Q 中的 k 个位置, 找出 $\sum_{i=1}^n C_{i\max}$ 最小的排列顺序, 放入序列 Q 中。

步骤 6: $k=k+1$ 。如果 $k>n$, 执行步骤 7; 否则返回步骤 5。

步骤 7: $l=l+1$ 。如果 $l>L$, 则得到了近似解 Q ; 否则返回步骤 4。

例如: 已知 $n=2, L=2, m_1=2, m_2=2, t_{1111}=2, t_{1121}=5, t_{2111}=7, t_{2121}=4, t_{1212}=6, t_{1222}=3, t_{2212}=9, t_{2222}=8$ 。通过上述算法可得到专业 1 维修顺序为: N_{111} (作战单元 1 的第 1 个故障装备), N_{211} (作战单元 2 的第 1 个故障装备)。专业 2 维修顺序为: N_{222} (作战单元 2 的第 2 个故障装备), N_{122} (作战单元 1 的第 2 个故障装备)。优化值为 33。但随着问题规模的增大, 使用该算法解的质量明显比较差。由于战时维修任务量大, 装备专业多, 还要考虑故障装备的多个维修步骤, 问题规模显然更大。因此需寻求一种能解决大规模问题, 解的质量又较好的算法。

遗传算法 (genetic algorithm, GA) 是一类通用的优化算法, GA 以其并行的自适应寻优以及良好的智能搜索技术, 在解决大规模问题中受到了广泛的运用, 但对于特定问题其局部优化能力往往比较局限。而传统的局部搜索方法或规则尽管容易陷入局部极小, 但其局部搜索能力很强, 这正好能够克服 GA 的缺点; 因此, 鉴于 GA 和传统局部搜索方法或规则的互补特性, 许多场合将两者相结合使用, 以提高算法的优化质量和效率。

笔者结合问题的特点采用混合遗传算法, 利用改进的 NEH 启发式算法生成调度结果后, 并编码形成遗传算法个体, 与随机选择出的个体一道产生初始种群。启发式算法由于运用了经过检验的优先规则, 所生成的编码链具有较高的适应度; 因此, 在遗传算法框架中加入适当的、基于领域的局部搜索机制, 可构成一种全局搜索和局部搜索相结合的优化搜索算法。

2) 遗传算法主要参数设计^[7-8]。

针对问题的特殊性, 对遗传算法的主要参数需要进行特殊设计。

① 基于专业和故障装备的编码设计。

GA 不能够直接处理维修调度的参数, 因此需要通过编码将调度问题的参数表示成遗传空间由基因按一定结构组成的染色体或者个体。串行同顺序维修任务调度问题中因为同一专业故障装备维修步骤事先确定并相同, 因此编码方法选择基于故障装备的编码方法, 简单直接且易于交叉和变异操作。每个调度根据故障装备来构造, 将各个故障装备编码为相应的整数变量。对于一个给定的故障装备维修序列, 第 1 个故障装备的维修步骤将首先被调度, 然后考虑第 2 个故障装备的维修步骤, 依次进行, 直到所有的故障装备安排完。

又因为故障装备群是分专业维修的, 可由多个子排列联合构成染色体, 其中每个子排列为一个专业故障装备群的随机完全排列。以 n 个作战单元分属 $l(l=1,2,\dots,L)$ 个专业的故障装备为例: 可由 L 个子排列联合构成染色体, 其中每一子排列染色体 $\sum_{i=1}^n s_{il}$ 个为第 $l(l=1,2,\dots,L)$ 专业故障装备的随机完全排列, 并且由 $L-1$ 个*将其分成 L 段, 每一子段表示该阶段 (专业) 故障装备的维修顺序。显然多次重复上述染色体生成过程可产生多个不同的调度方案, 进而构成遗传算法的种群。譬如: 如果考虑 2 个作战单元分属 3 个专业的维修任务调度问题, 故障装备编

号如表 1 所示。

表 1 故障装备及编号

故障装备	编号	故障装备	编号	故障装备	编号
N_{111}	1	N_{132}	1	N_{153}	1
N_{121}	2	N_{142}	2	N_{163}	2
N_{211}	3	N_{232}	3	N_{253}	3
N_{221}	4	N_{242}	4		

注: N_{ijl} 表示第 i 个作战单元第 j 个故障装备所属于 l 专业。

则染色体[1 2 3 4 * 1 2 3 4 * 1 2 3]表示为第 1 专业的维修顺序为 $N_{111}, N_{121}, N_{211}, N_{221}$, 第 2 专业的维修顺序为 $N_{132}, N_{142}, N_{232}, N_{242}$, 第 3 专业的维修顺序为 $N_{153}, N_{163}, N_{253}$ 。

② 适应度函数设计。

遗传算法遵循自然界优胜劣汰的原则, 在进化搜索中用适应度表示个体的优劣, 作为遗传操作的依据。按照编码规则对染色体进行解码运算, 维修任务调度的适应度取为 $f(v_k) = 1 / \sum_{i=1}^n C_{imax}$, C_{imax} 为作战单元 i 最大修复时间。

③ 选择操作。

选择操作是按适应度在子代种群选择优良个体的算法, 个体适应度越高被选择的概率就越大。最常用的方法是比例选择、基于排名的选择和锦标赛选择。这里采用的是适应度比例方法即赌轮选择, 该方法中个体选择概率与适应度值成比例。当全体规模为 N , 个体 v_k 的适应度为 f_{v_k} 时, 个体被选择的

的概率为 $f_{v_k} / \sum_{v_k=1}^N f_{v_k}$ 。

④ 交叉操作。

由于调度问题中的染色体具有一定的实际意义, 如果随意交换和重组一段基因, 生成的子个体很有可能不是一个可行的调度。鉴于编码的特殊意义, 交叉操作需要作特殊设计。

首先随机选择交叉阶段(可以是多个), 二后代个体分别继承父代个体非交叉阶段上的所有的基因, 对于交叉阶段, 后代首先继承二父代个体的分隔符位置, 然后对所确定的交叉阶段上的故障装备排列进行部分映射交叉(the partially matched cross over, PMX)操作, PMX 能够一定程度上满足模式定理使最佳模式得以最大可能保留。从而得到后代个体在该阶段上的所有故障装备的新排列。

例如: 在维修任务调度中二父串分别为:

$$P_1 = [1\ 2\ 3\ 4\ *1\ 2\ 3\ 4\ *4\ 6\ 5\ 3\ 1\ 2]$$

$$P_2 = [1\ 3\ 4\ 2\ *1\ 2\ 4\ 3\ *2\ 1\ 4\ 3\ 5\ 6]$$

首先随机确定交叉阶段 1 和 3, 然后对[1 2 3 4]和[1 3 4 2]进行 PMX 交叉操作(随机交叉位置为 1

和 3)的结果为[1 3 4 2]和[1 2 3 4], [4 6 5 3 1 2]和[2 1 4 3 5 6]进行 PMX 交叉操作(随机交叉位置为 1 和 4)的结果为[6 1 4 3 5 2]和[2 6 5 3 1 4]。因而后代个体为[1 3 4 2 * 1 2 3 4 * 6 1 4 3 5 2]和[1 2 3 4 * 1 2 4 3 * 2 6 5 3 1 4]。显然, 这种交叉操作保证了后代个体的合法性。

⑤ 变异操作。

变异的主要目的是维持解群体的多样性, 同时修复和补充选择、交叉过程中丢失的遗传基因, 在遗传算法中属于辅助性的搜索操作。对于一个施加变异操作的个体, 随机选择变异阶段, 后代个体首先继承父代个体非变异阶段上的所有基因, 然后对变异阶段上的某些随机位置上的基因进行逆序 INV 操作, 变异概率 P_m 一般不能取太大。

例如: 对染色体[1 3 4 2 * 1 2 4 3 * 1 2 4 3 6 5]随机确定第三阶段进行变异操作, 二随机变异位置为 2 和 5, 则 INV 的结果为[1 3 4 2 * 1 2 4 3 * 1 6 3 4 2 5]。

3) 算法流程。

步骤 1: 输入专业领域数目 L , 维修小组数 $m_l(l=1,2,\dots,L)$, 作战单元数 n , 各专业领域故障装备数 $s_{il}(i=1,2,\dots,n; l=1,2,\dots,L)$, 故障装备编号 $N_{ijl}(i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,s_{il}; l=1,2,\dots,L)$, 以及维修步骤 N_{ijkl} 所需维修时间 t_{ijkl} 。

步骤 2: 初始种群。采用改进 NEH 法产生一个初始解, 同时随机产生其他个体, 来共同组成初始种群。

步骤 3: 随机确定一个或多个交叉阶段, 然后在交叉阶段随机确定二个交叉点, 交叉操作采用 PMX 方式, 交叉操作对当前种群中的最优个体和另一随机选取的个体来进行, 并重复 $P_s/2$ 次(P_s 为种群规模), 然后保留新旧个体中最好的 P_s 个体进行后续的变异操作。

步骤 4: 随机确定一个或多个变异阶段(即专业), 然后在变异阶段随机确定变异位置, 变异操作采用 INV 操作, 整个搜索进程保留最好解。

步骤 5: 终止准则采用固定进化代数, 考虑问题的规模的影响, 取最大进化代数为

$$\left(\sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^L s_{il} \times \sum_{l=1}^L m_l\right)^\circ$$

4 仿真实验与分析

1) 实验数据。

为了测试算法的时间效率和优化效果, 测试问题根据作战单元数量, 所属专业数量, 包含的维修任务个数及维修小组个数来选取。笔者分别选取 3

个专业，每个专业 3 个维修小组承担 3 个作战单元 的 16 个故障装备调度问题。相关情况如表 2。

表 2 16 个故障装备相关情况

步骤编号	维修时间	步骤编号	维修时间	步骤编号	维修时间	步骤编号	维修时间
N_{1111}	7	N_{1211}	14	N_{1312}	4	N_{1513}	6
N_{1121}	13	N_{1221}	8	N_{1322}	6	N_{1523}	10
N_{1131}	8	N_{1231}	5	N_{1332}	15	N_{1533}	3
N_{2111}	7	N_{2212}	3	N_{2412}	17	N_{2513}	2
N_{2121}	4	N_{2222}	16	N_{2422}	5	N_{2523}	3
N_{2131}	3	N_{2232}	4	N_{2432}	3	N_{2533}	5
N_{3111}	5	N_{3312}	3	N_{3412}	4	N_{3513}	6
N_{3121}	17	N_{3322}	5	N_{3422}	2	N_{3523}	7
N_{3131}	8	N_{3332}	8	N_{3432}	1	N_{3533}	2
N_{3211}	6	N_{2312}	3	N_{1413}	12	N_{1613}	4
N_{3221}	4	N_{2322}	5	N_{1423}	3	N_{1623}	5
N_{3231}	3	N_{2332}	8	N_{1433}	1	N_{1633}	12

2) 实验结果。

因为不知问题的最优解或下界，为了考察其性能，在主频 2.4 G、内存 512 M 的计算机上采用

Matlab7.1 分别选取种群规模数为 50，迭代次数 $16 \times 9 = 144$ ， $P_k = 0.8$ ， $P_m = 0.15$ ，采用混合 GA 算法对问题仿真实验，结果如表 3。

表 3 实验仿真结果

调度方案	混合 GA	改进 NEH
优化值	136	160
专业 1 维修方案	$N_{311}, N_{321}, N_{111}, N_{121}, N_{211}$	$N_{311}, N_{321}, N_{211}, N_{121}, N_{111}$
专业 2 维修方案	$N_{332}, N_{132}, N_{342}, N_{232}, N_{222}, N_{242}$	$N_{132}, N_{342}, N_{232}, N_{332}, N_{222}, N_{242}$
专业 3 维修方案	$N_{163}, N_{253}, N_{353}, N_{153}, N_{143}$	$N_{163}, N_{253}, N_{353}, N_{143}, N_{153}$

因为无法知道这些问题的最优解，把下列问题在 2 种算法下 20 次仿真得到的最优解 C^* ；20 次仿真的平均 CPU 时间 \bar{t} ；算法求得的解与最好解目标函数值的平均偏差百分比作为比较标准，统计结果如表 4。

由表 4 可知，混合 GA 是求解该问题有效的方法。虽然该算法求得解与当前最好解的偏差随着故障装备数的增加有所增大，但增大的速度是比较缓慢，当故障数达到 100 时，平均偏差只有 2.4%。随着问题规模的增加，遗传算法在时间上也是可行的。

表 4 遗传算法与改进 NEH 计算结果的对比

维修小组数	作战单元数	每个作战单元故障装备数	专业数	混合 GA			改进 NEH		
				C^*	平均偏差/%	\bar{t}/s	C^*	平均偏差/%	\bar{t}/s
5	3	5	1	183	0.24	10.15	202	10.5	0.247
5	3	10	2	258	0.53	21.34	297	15.3	0.256
10	4	10	3	936	0.40	27.56	1 126	20.4	0.270
10	4	15	5	674	0.95	40.25	829	23.1	0.474
20	5	15	6	945	1.20	66.97	1 233	30.5	0.615
30	5	20	10	1 167	2.43	110.23	1 647	41.2	0.723

因此，可得到如下结论：采用混合遗传算法解决串行同顺序维修任务调度问题具有较好的优化质量，经多次寻优结果一致，得到的调度方案明显好于改进 NEH 方法。

5 结论

为赢得战争胜利，战时要求武器装备尽快恢复战斗力。笔者提出的基于混合遗传算法的多专业多作战单元修理任务优化调度方法，实现了在现有条件下快速恢复作战单元整体战斗力的维修任务调度，对提高部队战斗力具有重要意义。

参考文献：

[1] Roger Cline. Maintenance scheduling for mechanical equipment[OL]. Denver: United states department of the interior bureau of reclamation. http://www.usbr.gov/power/data/fist/fist4_1a/4-1a.pdf.

[2] Roger Cline. Maintenance scheduling for electrical equipment[OL]. Denver: United states department of the interior bureau of reclamation. http://www.usbr.gov/power/data/fist/fist4_1b/fist4_1b.pdf.

[3] Daniel Frost, Rina Dechter. Maintenance scheduling problems as benchmarks for constraint algorithms[OL]. [2012.7]. <http://www.ics.uci.edu/~csp/r70b-maintenance-scheduling.pdf>.

[4] 王荣辉. 战时维修任务指派模型研究[D]. 解放军出版社: 应用高新技术提高维修保障能力会议论文集, 2005: 719-721.

[5] 张芳玉. 战时装备维修任务指派模型及算法研究[J]. 运筹与管理, 2006, 9(3): 62-65.

[6] 徐宗昌. 保障性工程[M]. 北京: 兵器出版社, 2002: 122-125.

[7] 邢文训, 谢金星. 现代优化计算方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999: 140-183.

[8] 王凌. 车间调度及其遗传算法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 14-15.