

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2010.11.007

## 基于遗传算法的装备维修任务规划

刘文宝, 王少华, 孟祥辉, 陈武  
(装甲兵工程学院 技术保障工程系, 北京 100072)

**摘要:** 针对装备维修任务规划的特点, 构建基于遗传算法的维修任务规划策略。结合装备维修工序, 对维修任务规划进行分析, 建立了以作业总维修工时最短为目标函数的维修保障任务规划数学模型。在此基础上, 构建了求解任务规划模型的遗传算法, 并对算法的实现规则进行了详细分析, 确保了模型的有效性和收敛性。最后, 以 4 台装备 5 个修理组为例, 验证了该方法的有效性。结果表明, 该算法能确保模型的有效性和收敛性, 模型能有效处理装备维修任务规划问题, 下一步将对算法作进一步的改进和完善。

**关键词:** 维修保障任务; 装备维修; 遗传算法  
**中图分类号:** TP301.6; TH165 **文献标识码:** A

## Equipment Maintenance Mission Programming Based on Genetic Algorithm

Liu Wenbao, Wang Shaohua, Meng Xianghui, Chen Wu  
(Dept. of Technology Support Engineering, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China)

**Abstract:** Constructed a maintenance mission programming strategy based on genetic algorithm, according to the feature of mission programming of equipment maintenance. Combined with equipment maintenance procedure, the maintenance mission planning is analyzed, and then a maintenance support mission programming mathematic model which aims to minimizing the overall maintenance time is proposed. Based on the model, a genetic algorithm is designed and the actual rules of the algorithm are analyzed in detail, thus guaranteed the validity and convergence of the model. Finally, an example with 4 equipment and 5 maintenance groups verified the convergence of the genetic algorithm. According to the result, the algorithm can make sure of the convergence and validity of the model, the model can efficiently deal with medium maintenance mission programming, the following study would be go on improving and completing the algorithm.

**Keywords:** maintenance support mission; equipment maintenance; genetic algorithm

### 0 引言

在装备维修中, 维修工序的规划是影响装备维修质量和效率的重要因素。在按照专业进行维修人员编组的方式下, 单台装备维修中一个维修组只承担相应专业的单项任务。因此, 在单台装备维修工序确定的情况下, 多台装备并行维修具有确定的任务分配方案。笔者以维修工时为评价指标, 研究在上述条件下, 确定最优维修任务规划方案。

上述问题是一种 Job-shop 问题, 传统的图论搜索方法往往会遇到组合爆炸问题。遗传算法是解决该类问题的有效方法。该算法能够在无需遍历解空间的情况下, 得到问题的最优解或次最优解。本文运用遗传算法进行模型求解, 设计相应的遗传规则, 以保证模型求解的效率和解的收敛性。

### 1 维修任务规划建模

#### 1.1 装备维修任务分析

目前装备维修作业方式以分组包干为主, 即将全部维修人员编入不同的维修组, 每组人员完成全装维修中的一段任务。由于整装维修工序复杂、涉

及多个专业工种, 包干分组难以高效地完成维修任务, 不仅增加了管理成本, 而且无法保证维修质量。故提出基于维修能力的编组方式, 将待修装备的功能分组, 并针对各个功能设立维修组。将维修任务定位到系统、单元级别, 安排不同的专业组进行配合完成装备的维修任务。各维修组人员固定, 在维修过程中独立完成各自任务。

由于装备维修涉及不同车型的维修任务, 各车型在维修工序、维修范围和维修深度等方面有不同的规范。维修任务具有以下特点:

- 1) 各组针对各待修装备有确定的维修工序和工时数据;
- 2) 各组在整装维修过程中只承担其中一项任务。

#### 1.2 任务规划数学模型

##### 1.2.1 模型假设

- 1) 单台装备维修工序间有严格的顺序关系, 各组不能同时进行;
- 2) 上一道工序完成后立即送下道工序进行, 即忽略工序间的人为延时;
- 3) 工序中断, 即一个维修组在完成一个工序后才能进行下一个任务;
- 4) 单日工作时间内无法完成的工序, 在下一个

收稿日期: 2010-05-10; 修回日期: 2010-06-24

作者简介: 刘文宝 (1953-), 男, 山东人, 副教授, 从事装甲装备维修工艺与技术研究。

工作日继续, 工时不变; 5) 维修时间计算中不考虑工作中的休息和非工作时间。

模型的符号包括:  $p_{ij}$  为完成装备  $i$  的第  $j$  道工序的维修组序号;  $t_{ij}$  为装备  $i$  第  $j$  道维修工序所用工时;  $\omega_{ij}$  为装备  $i$  在工序  $j-1$  和工序  $j$  之间的延迟时间;  $B_{i,j}$  为  $p_{ij}$  开始维修装备  $i$  第  $j$  道工序的时间;  $E_{i,j}$  为  $p_{ij}$  完成维修装备  $i$  第  $j$  道工序的时间。

假设某时段内共有  $m$  台待修装备, 每台装备有  $n$  个待恢复功能, 维修工序已经事先给定, 即每台装备每个维修工序所需维修组及维修工事先已知。

将维修工序和维修时间信息表达为  $m \times n$  阶工序描述矩阵  $P$  和工时矩阵  $T$ :

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1n} \\ p_{21} & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ p_{m1} & \dots & \dots & p_{mn} \end{bmatrix}$$

$$T = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & \dots & t_{1n} \\ t_{21} & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ t_{m1} & \dots & \dots & t_{mn} \end{bmatrix}$$

### 1.2.2 建立模型

各类装备维修工序比较固定, 而多台装备同时维修时可能造成任务冲突, 即一个维修组可能同时面临来自 2 台装备或 2 台以上的待修任务, 形成维修延迟时间。因此, 需要进行决策的就是怎样为各个维修组安排任务顺序, 以缩短平均维修耗时或单台装备最长维修耗时, 根据装备维修的特点, 选择单台装备最长完工时间  $S_{\min}$  最小为目标函数, 则有:

$$S_{\min} = \max_{\forall i \in \{1, 2, \dots, m\}} S_i \tag{1}$$

约束条件为:

$$\left. \begin{aligned} E_{i,j} &= B_{i,j} + t_{ij} \\ B_{i,j} &= \max\{E_{i,j-1}, E_{k,l}\} \\ S_i &= E_{i,n} \end{aligned} \right\} \tag{2}$$

其中,  $E_{i,j-1}$  为装备  $i$  第  $j$  道工序的前一道工序完成时间;  $E_{k,l}$  为维修组  $p_{ij}$  在开始装备  $i$  第  $j$  道工序之前完成前一个装备  $k$  第  $l$  道工序的时间;  $E_{i,n}$  为装备  $i$  最后一道工序完成时间。

## 2 模型求解

上述装备维修任务规划是一个 NP 问题, 对此

类复杂问题只能求得近似解, 而遗传算法 (Genetic Algorithm, GA) 作为全局优化搜索方法, 具有表达的广泛性、简便性、鲁棒性、适合于并行处理等特点。因此, 采用遗传算法对模型求解。

### 2.1 编码和解码

编码是遗传算法应用中的首要问题, 必须结合具体领域知识, 选择合适的遗传编码方式。根据任务分配模型的特点, 选择十进制编码方式。由于装备维修任务分配模型的解就是待修装备对各维修组的排序, 所以十进制编码能将问题的解一一映射为染色体, 简化了编码与解码过程。因此, 算法采用实值编码方式。

建立  $p \times m$  阶维修顺序矩阵  $D$ , 矩阵  $D$  中行号表示维修组编号, 列号表示维修任务顺序,  $D$  中元素  $d_{ij}$  表示第  $i$  维修组的第  $j$  个维修任务对应装备的编号。例如: 某顺序矩阵第  $k$  行数值为  $(2, 5, \dots, 4)$ , 表示第  $k$  维修组首先完成装备 2 上的任务, 然后完成装备 5 上的任务, 最后完成其在装备 4 上的任务。将维修顺序矩阵编码为染色体, 将维修顺序矩阵中的实数值依次赋值到染色体基因位, 可得到一个长度为  $p \times m$  染色体子串, 即为一个个体染色体串。

将染色体串按照编码逆序进行解码。将  $(1, p \times m)$  维染色体向量变换为  $p \times m$  阶矩阵, 即为维修顺序矩阵。矩阵单一行向量表示一个维修组的任务顺序。通过上述步骤实现实际维修顺序与遗传染色体串之间的转换。

### 2.2 确定个体适应度值

适应度函数 *Fitness* 选择目标函数值作为适应度函数值。由于采用实数编码方式, 遗传过程中产生的染色体串对应的实际解可能为不可行解。在现实生产中映射为某阶段所有维修组的下一任务与装备下一工序交集为空。对于不可行基因串, 将其适应度值设为总时间之和, 即  $Fitness = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^p t_{ij}$ 。认为

采取逐台依次维修的维修顺序, 此种安排方式耗时最长, 效率最低。由于在种群选择策略中采用了改进的精英保留策略, 为了防止算法过早收敛, 采用基于排序的适应度分配策略, 可增大不可行解的早期生存概率, 以扩大算法早期的搜索空间。

### 2.3 遗传算子

#### 2.3.1 个体选择

为了保证群体具有良好的分散性, 随机产生初

始种群。个体选择采取随机遍历抽样策略, 该策略按照个体在该种群中的适应度水平选择个体, 个体被选择的概率与其适应度大小成正比。

为了降低非法染色体的影响, 采取精英保留策略以改进种群选取策略。设置保留概率  $Gap$  ( $0 < Gap < 1$ ), 则父代中有  $Nind * Gap$  个个体保留到子代中, 保留个体按照适应度值排序选定。子代中相应具有相同数量的个体按照适应度值被淘汰, 以保持种群规模的不变。

### 2.3.2 交叉规则

由于编码方式为实数编码, 如果进行单点交叉或 2 点交叉会产生违背维修工序的基因串。例如: 双亲分别为 (5 1 2 ↑ 3 4) 和 (1 2 4 ↑ 3 5) (“↑”——随机产生的交叉点), 则交叉后得到的子代分别为: (5 1 2 ↑ 3 5) 和 (1 2 4 ↑ 3 4)。在子代 (5 1 2 3 5) 中实数 5 出现了 2 次, 表示该组对第 5 台装备进行了 2 次维修, 这不符合装备维修工序准则。所以在遗传过程中应避免此类染色体出现。

对单点交叉规则进行修改: 以交叉概率  $P_c$  随机选择种群中的 2 个个体  $A$  和  $B$ , 再随机选取交叉点  $i$ 。将  $A$  和  $B$  染色体分为长度为  $m$  的  $p$  个片段, 假设选中交叉点所在片段  $k$  ( $k=1, 2, \dots, p$ ), 将  $A$  和  $B$  在  $k$  片段之前基因保留, 将  $A$  和  $B$  在  $k$  片段之后基因交换。将  $A$  片段  $k$  中从位置 1 到  $i$  基因保持不变, 将  $B$  片段  $k$  中未在  $A$  片段  $k$  前半部分出现的基因顺序保留, 用其替代  $A$  片段  $k$  的后半部分, 产生新个体  $A'$ 。同理产生新个体  $B'$ 。这种交叉方式避免了非法染色体的产生。例如:

双亲分别为  $A=(1\ 2\ 3\ |2\ \uparrow\ 1\ 3\ |2\ 3\ 1)$  和  $B=(3\ 2\ 1\ |3\ \uparrow\ 1\ 2\ |2\ 1\ 3)$  (“|”——基因片段分隔标志), 交叉点在第 2 片段产生, 则交叉后子代新个体分别为  $A'=(1\ 2\ 3\ |2\ \uparrow\ 3\ 1\ |2\ 1\ 3)$  和  $B'=(3\ 2\ 1\ |3\ \uparrow\ 2\ 1\ |2\ 3\ 1)$ 。

### 2.3.3 变异规则

变异操作是针对个体基因进行的, 采用移位变异规则。以变异概率  $P_m$  随机选择个体, 再随机选择染色体串变异点, 将此基因与本片段内相邻基因倒置, 若该基因位于片段最后一位, 则将该基因与该片段第一位基因倒置。例如某个体  $A=(1\ 2\ 3\ \uparrow\ 5\ 6\ 4)$ , 则变异后的个体  $A'=(1\ 2\ 3\ \uparrow\ 6\ 5\ 4)$ 。

### 2.4 死锁的判断

由于选择基于机器工序排列矩阵的编码方式,

在遗传过程中会产生死锁现象, 必须提出可行的死锁判断策略。根据  $P$  和  $D$  两矩阵所确定的维修顺序判断是否存在死锁。设置 2 个指针数组  $pointp(m)$  和  $pointd(p)$  分别指示当前的装备维修进度和人员的工作进度,  $pointp(i)$  ( $i=1, 2, \dots, m$ ) 指向装备  $i$  的下一步工序,  $pointd(j)$  ( $j=1, 2, \dots, p$ ) 指向维修组  $j$  的下一步维修任务。若  $pointd(j)$  所指向的任务和  $pointp(i)$  所指向的维修工序有相同的  $(i, j)$ , 则表明该装备下一步维修工序可以开始, 否则就会产生死锁。完成工序  $(i, j)$  后, 改变指针位置,  $pointd(j) = pointd(j) + 1$ ,  $pointp(i) = pointp(i) + 1$ , 直到所有工序都判断完毕。

- 1)  $times=1, pointp(i)=1, pointd(j)=1, ;$
- 2)  $times > p * m ? (\text{step6}, \text{step3});$
- 3) 存在  $(pointp(i), i) = (j, pointd(j)) ? (\text{step5}, \text{死锁并转入 step6});$
- 4)  $point(i) = point(i) + 1, point(j) = point(j) + 1;$
- 5)  $times = times + 1, \text{转入 step2};$
- 6) 计算适应度函数值, 结束。

### 3 算法示例

通过示例验证算法的可行性和收敛性。假设某段时间内有 4 辆待修装备和 5 个维修组。装备的维修工序矩阵和工时矩阵已知, 分别为:

$$\begin{bmatrix} 1 & 3 & 2 & 4 & 5 \\ 3 & 2 & 4 & 1 & 5 \\ 2 & 3 & 4 & 1 & 5 \\ 4 & 1 & 3 & 5 & 2 \end{bmatrix} \text{ 和 } \begin{bmatrix} 2 & 4 & 3 & 1 & 6 \\ 4 & 5 & 1 & 8 & 3 \\ 1 & 4 & 6 & 3 & 2 \\ 3 & 5 & 9 & 4 & 2 \end{bmatrix}。$$

运用遗传算法, 设置初始种群规模  $Nind=40$ , 最大迭代代数  $Maxgen=100$ , 交配概率  $P_c=0.75$ , 个体变异概率  $P_m=0.15$ , 父代保留概率  $Gap=0.9$ 。

经计算得到维修顺序矩阵为:

$$\begin{bmatrix} 1 & 4 & 3 & 2 \\ 3 & 2 & 1 & 4 \\ 2 & 3 & 1 & 4 \\ 4 & 3 & 2 & 1 \\ 1 & 4 & 3 & 2 \end{bmatrix}。$$

目标函数值为 31 h, 即最早全部完工时间为 31 h。

维修任务甘特图如图 1。

如图 1, 各台装备上同一维修组承担的任务用同一填充类型的条形框表示, 条形框长度表示维修工时, 空白段表示装备在此段时间未进行维修。由图 1 可知: 4 台待修装备完工时间分别为 22 h、31 h、28 h 和 28 h。第 2 台装备所用时间最长, 目标函数值为 31 h。算法收敛特性如图 2。

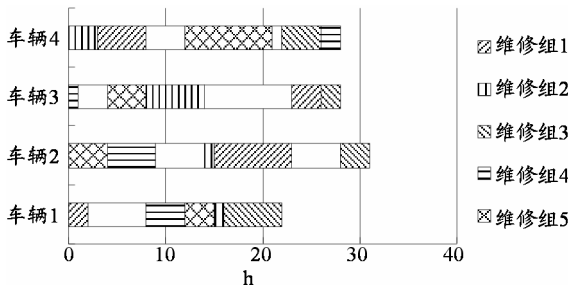


图 1 任务甘特图

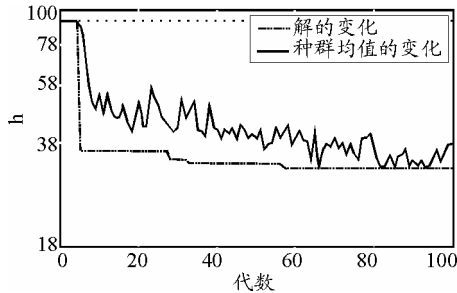


图 2 迭代曲线图

### 4 结论

示例分析表明，该模型能有效处理装备维修任

\*\*\*\*\*

(上接第 13 页)

[52] Simon X Yang, Max Meng. An Efficient Neural Network Approach to Dynamic Robot Motion Planning[J]. Neural Networks, 2000, 13(2): 143-148

[53] Lianfang Tian, Curtis Collins. An effective robot trajectory planning method using a genetic algorithm[J]. Mechatronics, 2004(14): 455-470.

[54] 张建英, 刘曦. 基于人工势场法的移动机器人最优路径规划[J]. 航空学报, 2007(28).

[55] Roy B.V. Learning and Value Function Approximation in Complex Decision Processes[D]. PhD. Thesis, MI.T., 1998.

[56] 蔡自兴, 陈虹. 未知环境中移动机器人导航控制研究的若干问题[J]. 控制与决策, 2002, 17(4): 385-390.

[57] R.M.Robin H. K., M.Alisa, et al.. Integrating explicit path planning with reactive control of mobile robots using trulla[J]. Robotics & Autonomous Systems, 1999, 27(4): 225-245.

[58] N.Nilsson. Artificial Intelligence: A New Synthesis[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.

[59] Brooks R., et al. A Robust Layered Control System for a Mobile Robot[J]. IEEE Trans. Robotics and Automation, RA-2(1986), 14-23.

[60] Yang X.He K.Guo M. A Prototype Toward Autonomous Navigation: The THMR-III[C]. In: Proceedings of 1998 International Conference on Advances in Vehicle Control and Safety—AVCS'98 Amiens·France, 1998.

[61] E.Gat. Integrated planning and reacting in a heterogeneous asynchronous architecture for controlling real world mobile robots[C]. Proc of the AAAI-92, Menlo Park, 1992: 809-815.

务规划问题，验证了遗传算法的可行性和收敛性。但由于遗传编码方式的缺点，遗传算法在求解过程中会产生不可行解，对算法的收敛性产生了很大影响。下一步将对算法进行改进和完善。

### 参考文献:

[1] Goldberg D. Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning[M]. Boston: Addison-Wesley, 1989.

[2] 雷英杰, 张善文. MATLAB 遗传算法工具箱及应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005.

[3] 李敏强, 寇纪松, 林丹, 等. 遗传算法的基本理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002.

[4] 李小平. 用定解最优保存遗传算法解决 Job-shop 调度问题的研究[J]. 飞机设计, 2007, 27(3): 19-22.

[5] 彭勇, 田澎, 蒋馥. 不平衡设备流维修与遗传算法设计[J]. 上海交通大学学报, 2004, 38(3): 491-493.

[6] 安晶, 秦珂. 一种基于遗传算法的车间调度算法求解[J]. 盐城工学院学报, 2007, 20(1): 33-36.

[7] 李阳, 武昌, 雷志雄. 装备维修保障信息化建设的若干问题[J]. 四川兵工学报, 2009(4): 113-115.

[62] R.Arkin. An Architecture for Vision Based Robot Navigation[C]. Proceedings of the 1987 DARPA Image Understanding Workshop, Los Angeles, 1987: 417-431.

[63] E.Gat. On Three-Layer Architectures. Artificial Intelligence and Mobile Robots[M]. MIT Press, 1998.

[64] K.Konolige e. a.. The saphira architecture: A design for autonomy[J]. Journal of Experimental and Theoretical Artificial Intelligence, 1997, 9(1): 215-235.

[65] Fazio J and Roupail N., Conflict Simulation in INTRAS:Application to Weaving Area Capacity Analysis, Transportation Research Record No.1287,Transportation Research Board,Washington DC. 1990.

[66] Halati A,Torres J, Freeway Simulation Model Enhancement and Integration FRESIM Calibration/Validation[C]. Federal Highway Administration, Report No.DTFH61-85- -C-00094, 1990.

[67] Mechanical Simulation Corporation. CarSim 5.14 User Manual. 2002, 9.

[68] Zarean M. and Nemeth. WEAVSIM: A Microscopic simulation model of freeway weaving sections[C]. Transportation Research Record, 1990: 48-54.

[69] K. Rathi, Nemeth. FREESIM:A Microscopic Simulation Model of Freeway Lane Closures[C]. Transportation Research Record 1112, TRB, 986.

[70] 杜晓晖. 高速公路系统的仿真模型及其应用研究[D]. 北京工业大学, 2003(5): 8-13.

[71] Hebert M, Technology Development for Army Unmanned Ground Vehicles[J]. Robotics & Autonomous Systems, 2002.

[72] 宁俊帅, 李军, 李灏, 等. 军用车辆机动性评估方法[J]. 四川兵工学报, 2009(5): 49-51.