

# 基于 GA 与 DSM 的飞行机务保障价值流层次分割优化

张天明<sup>1</sup>, 张凤鸣<sup>2</sup>, 李超<sup>1</sup>, 刘刚<sup>1</sup>

(1. 空军工程大学工程学院, 陕西 西安 710038; 2. 空军工程大学训练部, 陕西 西安 710051)

**摘要** 针对保障任务交互复杂、作业流程刚性较大等问题, 提出一种基于设计结构矩阵和遗传算法的飞行保障价值流层次分割优化方法。建立了真实情况下的飞行机务保障价值流传递模型, 根据价值流时滞槽蓄特性分析结果, 提出了通过价值活动聚类优化改善价值流通能力的思路; 设计了遗传算法与 DSM 组合聚类优化具体步骤, 并给出了 DSM 模型与聚类情况的映射关系; 建立了基于聚类权重、聚类规模以及聚类总数的适应度函数和保障活动价值传递增益参数, 进行价值活动遗传聚类算法和聚类活动解耦优化算法设计。最后, 结合某机务大队保障实例对算法进行验证, 结果证明所得飞行保障价值流的优化模式有效可行。

**关键词** 价值流; 飞行机务保障; 层次分割优化

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2011.03.004

**中图分类号** V37; N945.15 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2011)03-0015-05

航空装备的高技术化和综合化使得原有系统边界模糊, 系统交联激增, 呈现出模块化、自动化等特征, 促使维修保障专业分工向着功能分工发展, 要求机务飞机保障具有更高的保障强度、保障质量、保障柔性, 因此必然引起维修保障流程的变化。当前机务保障主要存在保障任务交互复杂、作业流程刚性较大、资源利用率不高等问题。精益生产<sup>[1]</sup>作为丰田模式的核心成果, 已被应用于军事维修保障流程优化<sup>[2]</sup>。价值流方法<sup>[3-4]</sup>是精益思想中消除浪费、尽善尽美的重要工具, 但在提出改进方案时其缺乏定量规范的模型。本文将通过分析价值流传递过程, 提出层次分割优化思想, 建立飞行机务保障价值流智能优化模型, 为提高机务保障效能提供新途径。

## 1 飞行机务保障价值流传递过程

从价值流生成过程看, 飞行机务保障流程各阶段活动中既有信息、航材、角色等各项投入, 又同时显示出活动价值的激活和传递。由于受时空特性、任务属性、资源状态等因素影响, 飞行机务保障价值流动呈现出动态性复杂, 传递方向与流程运行方向相反。假设飞行保障流程  $t$  时刻有  $m$  个输入活动与  $n$  个输出活动。 $Q_{i,l}(t)$ 、 $Q_{o,k}(t)$  分别为该点  $t$  时刻第  $l$  个输入活动量和第  $k$  个输出活动量,  $V_{Ti,l}(t)$ 、 $V_{Ti}(t)$  分别为  $t$  时刻输出活动向上传递给第  $l$  个输入活动价值和输入活动总价值,  $V_{To,k}(t)$ 、 $V_{To}(t)$  分别为  $t$  时刻第  $k$  个输出活动价值和输出活动总价值。则该时刻的价值传递示意图, 见图 1。

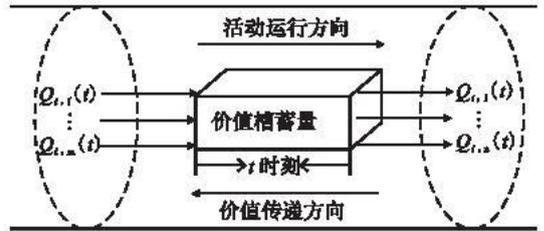


图1 保障活动价值传递示意图

Fig. 1 Transfer diagram of support activities value

当保障流程处于理想精益状态时,  $t$  时刻流程断面的输入活动传递价值与输出活动价值一致, 各输入活

\* 收稿日期: 2011-03-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71071126)

作者简介: 张天明(1983-), 男, 陕西延川人, 博士生, 主要从事信息系统工程与智能决策研究

E-mail: mubiaotian@qq.com

动价值由根据输入量的大小确定。但在真实情况下,飞行机务保障流程存在库存、周期、空间等的“浪费”,导致流程活动价值传递具有时滞特性,具有价值“槽蓄”现象。则各输入活动价值应根据实际输出活动总价值确定。结合文献[5],建立飞行机务保障流程活动价值流时滞传递模型:

$$V_{Ti}(t) = \sum_{l=1}^m V_{Ti,l}(t) = V_{To}(t) \sum_{l=1}^m Q_{i,l}(t) / \sum_{k=1}^n Q_{o,k}(t) \quad (1)$$

$$R(t) = V_{To}(t) / V_{Ti}(t) = \sum_{k=1}^n Q_{o,k}(t) / \sum_{l=1}^m Q_{i,l}(t) \quad (2)$$

由式(1)知,当流程处于精益状态时,流程活动价值能够及时的、全部地传递给输入活动。反之,则会被时滞,即该时刻输入活动的传递价值是输出活动价值与所有后继时刻的输出活动价值总和。所以,具有较强关联关系的流程活动传递价值具有时间敏感性;由式(2)知, $t$ 时刻保障活动传递价值增益  $R(t)$  与输入输出活动量的比值正相关。

## 2 价值流层次分割优化基础

根据价值流时滞传递模型结论,可从保障活动交互时空与组合模式出发实施分割优化。基本思想是通过变换设计结构矩阵<sup>[6]</sup> (Design Structure Matrix, DSM) 行列元素来实现保障活动的分割聚类运算,缩短对保障资源的等待;通过比较保障活动传递价值增益  $R(t)$  实现保障活动的聚类内部重新组合,合理调整价值活动执行次序。考虑到飞行机务保障流程较为复杂,模块化也不明显,在流程活动 DSM 初始模型上手工聚类,其结果最优性得不到保证。所以,采用遗传算法<sup>[7]</sup> 来实现保障价值流分解聚类的智能化和最优化。则建立价值流层次分割优化步骤见图 2。

假设飞行机务保障价值活动 DSM 的行列元素数为  $p$ , 最大聚类数为  $q$ , 则二维编码矩阵为  $p \times q$  矩阵。矩阵元素为其对应列活动到行活动的联系权重,矩阵的每一行对应于一个聚类,最后一行为 Bus 类。矩阵每一列按聚类前的 DSM 排列顺序进行排列。它的每个单元格表示它所对应的行列元素是否在其所对应的聚类中。如果在,值为 1, 否则为 0。每一种聚类情况都可以映射到一个染色体编码矩阵。从染色体编码矩阵到聚类情况的映射方法,见图 3。

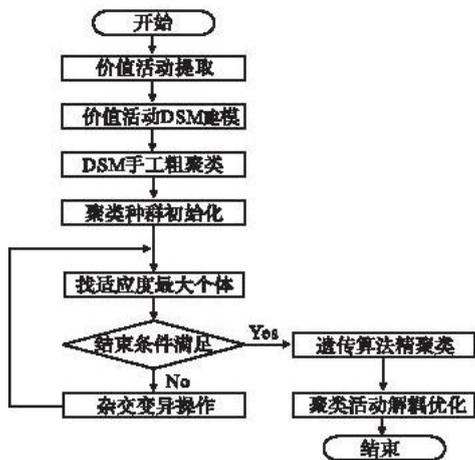


图2 价值流优化步骤

Fig. 2 Steps of value stream optimization

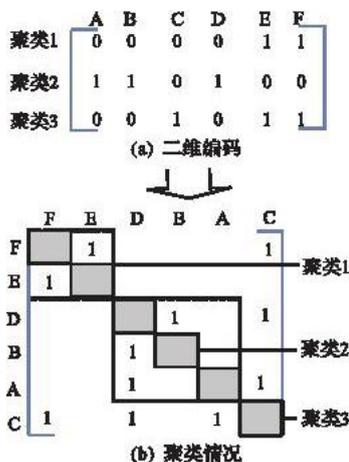


图3 聚类到二维编码的映射

Fig. 3 Projection of cluster and dimension 2

## 3 价值流层次分割优化算法设计

由上述可知,飞行机务保障价值流优化核心是价值活动遗传聚类和聚类活动解耦优化,即层次分割优化算法。设计算法如下:

### 3.1 价值活动遗传聚类算法

经过飞行机务保障流程价值活动 DSM 模型手工操作得到粗聚类集。由此来建立初始染色体。遗传优

化阶段的处理过程如下:

**步骤1** 种群初始化。染色体采用二进制编码。染色体的长度等于上阶段得到的初始聚类的规模  $k$ 。假设上阶段得到的初始聚类集为  $c = \{c_1, c_2, \dots, c_k\}$ , 则随机产生一个  $k$  位的二进制编码。若  $c_i$  被选中, 第  $i$  位为 1, 否则为 0。重复进行这个操作, 直到染色体全部被初始化。

**步骤2** 适应度计算。本文适应度函数根据保障价值活动聚类权重、聚类规模以及聚类总数<sup>[8]</sup>进行计算。假定在任意一代种群中的第  $h$  个染色体中, 聚类实际总数记为  $n_h$ 。该染色体中第  $i$  个聚类中的第  $j$  个基因相对于其他不为 0 的基因对应的权重为:

$$W_{ij}^h = V_{ij}^h V_{jk}^h \sum_{k=1}^p d_{jk}^h \quad (3)$$

式中:  $V_{ij}^h$  为为该染色体的第  $i$  个聚类中第  $j$  个基因的值等于 0 或 1;  $V_{jk}^h$  为该染色体的第  $i$  个聚类中第  $k$  个基因的值等于 0 或 1;  $d_{jk}^h$  为该染色体中第  $i$  个聚类中第  $j$  个基因第  $k$  个基因对应的元素在初始 DSM 中的联系权重。若第  $h$  个染色体中第  $i$  个聚类中含有  $n_i$  个元素。则该聚类的染色体的聚类值  $C_i^h$  和整体聚类值  $C^h$  为:

$$C_i^h = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} W_{ij}^h \quad (4) \quad C^h = n_h \sum_{j=1}^n C_i^h \quad (5)$$

如果在种群中, 聚类数的上下界分别为  $C_{\max}$ 、 $C_{\min}$ 。第  $h$  个染色体的适应度函数可以描述为:

$$F(h) = (C^h - C_{\min}) / (C_{\max} - C_{\min}) \quad (6)$$

按适应度函数计算个体被选中的概率后, 采用蒙特卡罗法进行个体的选择。设群体大小为  $n$ , 第  $h$  个染色体被选择的概率  $p(h)$  可以由式(7) 求解:

$$p(h) = F(h) / \sum_{k=1}^n F(k) \quad (7)$$

**步骤3** 杂交与变异。采用二维多点杂交方法和二维基本变异方法。前者是对二维染色体矩阵中的每一行即每一个聚类采用 3 点杂交的方法。后者对二维染色体矩阵中的每一行执行基本变异, 随机产生多个变异点, 对变异点上的值进行“非”运算。

**步骤4** 终止条件。采用给定迭代次数或最优个体适应度连续 50 代未得到改善则终止遗传算法。

### 3.2 聚类活动解耦优化算法

经过遗传算法分割聚类后, 飞行机务保障价值活动被划分为  $n_c$  个聚类。每个聚类内部价值活动之间均存在较强的关联关系, 还需找出最优价值传递组合。假设飞行保障价值活动的第  $h$  个规模为  $n_h$  的聚类  $c_h$ , 包含价值活动  $A_h = \{a_i \mid 1 \leq a_i \leq n_h\}$ 。将信息联系权重作为价值活动投入量的基本度量。任意 2 个价值存在信息关联关系时, 信息输入者用“1”标度, 信息输出者用“0”标度。根据价值流传递公式(2) 可知, 令价值活动输入输出量的比值在流程运行方向上递增, 则使得传递价值平滑变化, 避免价值流在短期内被大量槽蓄。设计聚类  $c_h$  价值活动解耦优化算法<sup>[9]</sup> 如下:

**步骤1** 对任意活动  $a_j \in c_h$ , 计算活动输入量和活动输出量的比值  $R_j = \sum_j Q_{i,l} / \sum_j Q_{o,k}$ ;

**步骤2** 检索  $a_j \in c_h$ , 使  $R_k = \min\{R_j\}$ 。若  $k > 1$ , 先排  $\sum_j Q_{i,l}$  小的活动, 后排  $\sum_j Q_{o,k}$  大的活动;

**步骤3** 计算  $c_h = c_h - a_j$ , 若  $c_h = \emptyset$ , 跳转至步骤 5;

**步骤4** 将溢出活动删除, 跳转至步骤 1;

**步骤5** 聚类活动解耦过程结束。

## 4 某机务大队飞行机务保障实例

运用工作分解结构方法识别出机务大队保障流程活动 16 项, 删除牵引飞机、等待航材、等待工具 3 项浪费活动, 得到价值活动集合包含油气添加  $a_1$ 、外部察看  $a_2$ 、特设通电  $a_3$ 、通导通电  $a_4$ 、火控通电  $a_5$ 、军械通电  $a_6$ 、机械开车  $a_7$ 、弹药装挂  $a_8$ 、故障排除  $a_9$ 、质量检验  $a_{10}$ 、飞参判读  $a_{11}$ 、数据装订  $a_{12}$  和机组放飞  $a_{13}$ 。按照该机务大队实际保障流程, 建立规模  $n$  为 13 的保障价值活动 DSM 初始模型, 参见文献[10]。染色体的编码为  $4 \times 13$  矩阵, 种群大小设定为 10, 初始种群在 DSM 初始模型上进行手工行列变换得出。运用遗传算法分割

聚类,执行到123代时收敛。染色体迭代聚类过程见图4。收敛染色体经过解码映射到DSM模型,得到分解聚类结果,见图5。

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
初始染色体	聚类1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
	聚类2	0	0	1	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1
	聚类3	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0
	聚类4	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
收敛染色体	聚类1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
	聚类2	0	0	1	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1
	聚类3	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0
	聚类4	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0

图4 染色体1聚类过程

Fig.4 Clustering course of chromosome 1

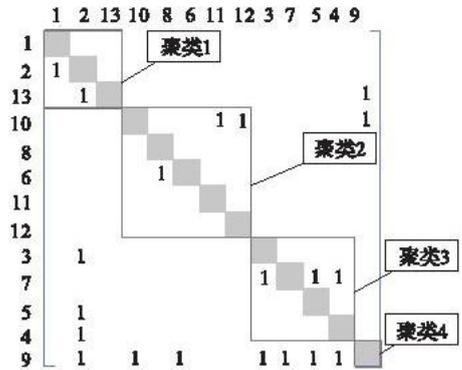


图5 价值活动聚类结果

Fig.5 Cluster result of value activities

在此初始染色体中聚类的实际总数可以通过该染色体编码矩阵获取,  $n_c = 4$ ; 式(5)中的  $V_{ij}^h$  和  $V_{ik}^h$  通过图4中的染色体编码来获取,  $d_{jk}^h$  由初始 DSM 模型对应的单元格值获得。根据式(3) - (5) 计算, 得到初始染色体1的聚类值  $c^1 = 15$ 。经过遗传算法分割聚类得到最优染色体, 得到该最优染色体的聚类值为  $c^* = 42$ , 与  $c^1$  相比聚类值大大增加了。因此, 飞行机务保障价值活动应划分为4个聚类: 聚类1(包含  $a_1, a_2, a_{13}$ )、聚类2(包含  $a_3, a_4, a_5, a_7$ )、聚类3(包含  $a_6, a_8, a_{10}, a_{11}, a_{12}$ )、聚类4(包含  $a_9$ )。然后, 对每个聚类进行内部价值活动解耦。限于篇幅, 仅以聚类3为例给出计算过程, 得出合理顺序为  $a_6 \rightarrow a_8 \rightarrow a_{11} \rightarrow a_{12} \rightarrow a_{10}$ , 见表1。

表1 聚类3活动解耦结果

Tab.1 Decoupling result of cluster 3

价值活动	6	8	10	11	12	溢出活动
第1步	0.5	1	$\infty$	0	1	6
$R_j$ 第2步		0	$\infty$	0	0	8, 11, 12
第3步			$\infty$			10

由飞行机务保障价值流分割优化结果知, 外部察看和机组放飞属聚类1, 是读卡操作部分, 便于1-2的综合师或员统一负责; 各专业通电通导属聚类2, 是飞机加电检查部分, 利于飞机状态的综合认定; 弹药装挂、飞参判读、数据装订和质量检验属聚类3, 是技术校验部分, 支持飞行适航性的综合审核; 故障排除作为整个飞行机务保障价值流的 Bus 聚类, 应抽调技术骨干独立组建排故中心, 减少保障价值流在此处槽蓄的可能。经过聚类活动解耦优化, 使得产生信息量大的价值活动优先执行, 降低了保障流程对信息的等待周期。该单位统计数据表明, 聚类优化后单机平均放飞时间从63 min 提前到42 min, 一般性故障平均排故时间从56 min 降到38 min。

## 5 结束语

本文从飞行机务保障实际出发, 分别建立了保障流程在真实情况下的价值流传递模型, 找出了价值流时滞槽蓄特性, 提出了飞行保障价值层次分割优化的改善思路。考虑到飞行机务保障的复杂性。采用 DSM 和遗传算法等方法, 建立价值活动遗传分割聚类算法和聚类活动解耦优化算法。最后, 结合某航空兵团机务大队飞行保障实例, 验证了算法的有效性。本文从定量角度得出飞行保障价值流聚类结果和组合结构, 为机务大队优化保障流程、提高保障效能提供理论前提和规范方法。

## 参考文献:

- [1] Levy D L. Lean production in an international supply chain[J]. MIT sloan management review, 1997, 54(1): 94 - 102.
- [2] 刘义乐. 精益维修及其支撑技术发展研究[J]. 装甲兵工程学院学报, 2005, 19(2): 15 - 19.  
LIU Yile. Investigation of lean maintenance and its technical development[J]. Journal of armored force engineering institute, 2005, 19(2): 15 - 19. (in Chinese)
- [3] Abdunalek Fawaz A Jayant Rajgopal. Analyzing the benefits of lean manufacturing and value stream mapping via simulation a process sector case study[J]. International journal of production economics, 2007, 5(10): 223 - 236.
- [4] 缪周, 徐克林, 李振飞. 基于价值流图的生产线再设计: 案例研究[J]. 工业工程, 2009, 5(12): 115 - 119.

- MIAO Zhou, XU Kelin, LI Zhenfei. Production line redesign by using value flow diagram: a case study[J]. Industrial engineering journal, 2009,5(12):115-119. (in Chinese)
- [5] 阮本清,张春玲. 水资源价值流的运移传递改进模型[J]. 水利学报,2005,36(4):396-400.  
RUAN Benqing, ZHANG Chunling. Improved model for transferring of water resources value flow[J]. Journal of hydraulic engineering, 2005,36(4):396-400. (in Chinese)
- [6] Browning R. Applying the design structure matrix to system decomposition and integration problem: a review and new directions [J]. IEEE transaction on engineering management,2001,48(3):292-306.
- [7] 高家全,何桂霞. 并行遗传算法研究综述[J]. 浙江工业大学学报,2007,35(1):56-59.  
GAO Jiaquan, HE Guixia. A review of parallel genetic algorithms [J]. Journal of Zhejiang university of technology, 2007,35(1):56-59. (in Chinese)
- [8] 刘建刚,王宇生,叶明. 基于遗传算法与 DSM 的产品结构分解聚类方法[J]. 南京航空航天大学学报,2006,38(4):454-458.  
LIU Jiangan, WANG Ningsheng, YE Ming. Decomposition and clustering of product architecture based on genetic algorithms and DSM[J]. Journal of Nanjing university of aeronautics & astronautics, 2006,38(4):454-458. (in Chinese)
- [9] 汤廷孝,廖文和,黄翔,等. 产品设计过程建模及重组[J]. 华南理工大学学报:自然科学版,2006,34(2):41-46.  
TANG Tingxiao, LIAO Wenhe, HUANG Xiang, et al. Modeling and re-engineering of design process for products[J]. Journal of south China university of technology: natural science edition, 2006,34(2):41-46. (in Chinese)
- [10] 李超,王瑛,汪晓程,等. 基于模块化理论的机务准备流程优化研究[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2011,12(1):83-86.  
LI Chao, WANG Ying, WANG Xiaocheng, et al. Study on process optimization of flight line maintenance based on modular theory[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2011,12(1):83-86. (in Chinese)

(编辑:徐敏)

## Study on Hierarchical Division Optimization of Flight Line Maintenance Value Stream Based on GA and DSM

ZHANG Tian - Ming<sup>1</sup>, ZHANG Feng - ming<sup>2</sup>, LI Chao<sup>1</sup>, LIU Gang<sup>1</sup>

(1. The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 2. Department of Training, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

**Abstract:** Aimed at the complicated structure and remarkable rigidity of its process, a method of hierarchical division optimization of flight line maintenance value stream based on GA and DSM is proposed. The value flow transferring model is built on the actual condition. According to its character of time - delay and propagation, an decoupling clustering method to improve the effect of value flow transferring is deduced. Then, its particular steps are given. The projection relationship between DSM model and cluster of value activities is defined. Futhermore, fitness function based on cluster weight, cluster scale, cluster number and decoupling parameter are designed. Therefore, The algorithm of value activities cluster based on GA and clustered activities decoupling decoupling. Finally, combining with case study of a military airfield. the validity of the model is proved, and the optimization pattern of flight line maintenance value stream is established.

**Key words:** value stream; flight line maintenance; hierarchical division optimization