

doi: 10.7690/bgzd.2013.07.011

## 多阶段保障设备种类归并优化方法

康晓明, 康锐, 王乃超

(北京航空航天大学可靠性与系统工程学院, 北京 100191)

**摘要:** 针对复杂装备保障设备种类优化问题开展研究, 提出了多阶段保障设备种类归并优化方法。该方法基于数学规划中的动态规划思想, 提出了按保障设备研制主体、保障设备专业、保障设备所属装备的功能系统等关系划分优化阶段的原则, 确定保障设备种类优化的优化目标, 给出决策策略函数定义及各阶段决策状态集确定方法, 并通过最优目标函数确定最优保障设备种类。该方法优化目标明确、计算方法简单, 为解决研制阶段复杂装备的研制主体面向大量保障设备的种类优化问题, 提供了理论支撑。

**关键词:** 保障设备; 种类确定; 多阶段; 保障性分析

**中图分类号:** TJ02 **文献标志码:** A

## Support Equipments Merging Via Optimizing Method Based on Multi-Stage Decision

Kang Xiaoming, Kang Rui, Wang Naichao

(School of Reliability &amp; System Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** In this paper, an application of mathematical programming was presented. The optimization of support equipment types of complex military equipments can be solved by the application which aims at fast and efficiency. The principles, such as support equipments contractors, specialties of support equipments, the functional systems supported by support equipments, optimization phase are given. The optimization object, policies of decision-making, the method of defining state set of each phase, high efficiency could be ensured with the method of finding the optimal result by the optimization object function are given. The method is clear objectives and simple calculation, can solve the support equipment types' optimization of complex military equipments during the acquisition phase.

**Key words:** support equipment; types decision; multi-stage optimization; supportability analysis

### 0 引言

保障设备的种类和数量是影响装备保障规模的重要因素, 在装备研制过程中减少保障设备的种类和压缩保障设备的数量是缩减保障规模的重要手段。尤其面向复杂、大型装备, 减少保障设备种类、降低保障设备数量的需求就更为迫切。如何在装备研制阶段计算和优化保障设备的需求数量已有很多研究方法: 文献[1]给出了基于神经网络法确定保障设备需求; 文献[2-4]给出了用排队论确定保障设备的品种和数量的方法; 文献[5-8]给出了基于保障活动或维修策略的保障设备需求量计算方法。但是鲜有文献研究提出归并保障设备种类的方法, 文献[9]仅给出了通过保障性分析确定保障设备种类的流程, 而没有给出归并保障设备种类的算法; 文献[10]给出了基于保障功能等价关系的保障设备种类归并优化方法, 但该方法在解决复杂装备大量保障设备种类优化的情况下有一定局限性, 算法的效率随装备种类数的增加而几何级数降低。笔者提出了优化

阶段的划分原则, 并给出按阶段保障设备种类优化的决策过程, 最后给出实例验证。该方法为解决研制阶段复杂装备的研制主体面向大量保障设备的种类优化问题, 提供了理论支撑。

### 1 优化问题描述

对于装备复杂程度不高, 保障设备种类不多的情况, 装备保障设备种类优化可依据保障设备之间的保障功能等价关系, 并通过优化目标(优化目标是决策最优保障设备种类清单的依据和基础, 可根据需求选择不同的优化目标)函数直接确定最优保障种类<sup>[10]</sup>。但是对于复杂装备而言, 其保障任务和保障设备种类繁多, 建立保障设备功能等价关系会非常复杂, 直接通过优化目标函数确定最优保障设备种类比较困难。在这种情况下, 保障设备种类归并优化过程可分阶段进行, 将复杂的决策过程分解为多个相对简单的决策过程。分解的过程是将所有保障设备种类按一定逻辑分组, 每阶段决策一组保障设备, 如图1所示。

收稿日期: 2013-01-15; 修回日期: 2013-02-14

作者简介: 康晓明(1980—), 男, 辽宁人, 博士, 从事装备综合保障研究。

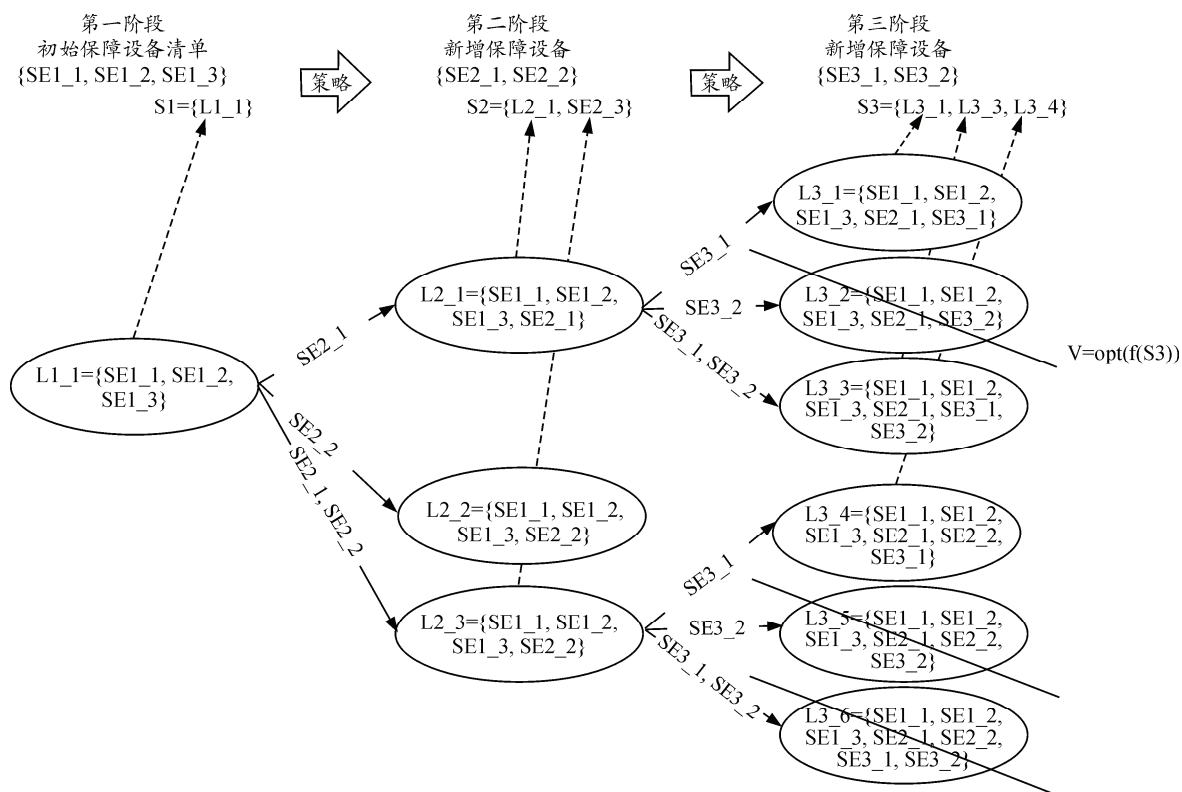


图 1 多阶段保障设备种类优化过程示例

图 1 示例中，将 7 种保障设备 (SE1\_1、SE1\_2、SE1\_3、SE2\_1、SE2\_2、SE3\_1、SE3\_2) 分为 3 组进行多阶段决策。每个阶段保障设备种类的组称为该阶段的一种状态，所有状态的集合记作状态集  $S$ 。第 1 阶段的状态集  $S_1$  包含唯一元素——第 1 组保障设备种类清单；第 2 阶段的状态集记为  $S_2$ ，它是根据状态集  $S_1$ ，并排除第 2 阶段不可能成为最优的保障设备组合得到；第 3 阶段的状态集记为  $S_3$ ，它是根据状态集  $S_2$  及一定的策略，并排除第 3 阶段不可能为最优的保障设备组合得到。第 3 阶段为最后一个阶段，因此  $S_3$  集合中每个子集代表可能为最优的保障设备种类组合。如果将最优目标函数设为  $V$  并给出最优解判定条件，那基于优化准则不断重复上述过程，可确定最优的保障设备种类清单。

在图 1 的示例中的最后阶段，保障设备种类状态集  $S_3$  共有 6 个元素，因此需要进行最优分析的状态空间有 6 个。如果采用直接寻优的方法，那么 7 类保障设备构成集合的所有非空子集均需要进行最优分析，即待分析对象有 127 个状态空间，而随着集合中元素的增加，待分析状态空间的数量将急速增加。因此，通过多阶段方法进行保障设备种类优化，在最后寻优时的计算量要远远小于直接寻优的过程。保障设备种类数越多，这种优势就越明显。

## 2 确定决策阶段的原则

多阶段保障设备种类优化的一个关键问题是确定划分决策阶段的原则。确定决策阶段的原则涵盖划分决策阶段和确定决策顺序。划分决策阶段的原则是按一定逻辑关系将保障设备分组，将针对每组保障设备的优化决策划分为一个阶段。常用的逻辑关系包括按保障设备研制主体、保障设备专业、保障设备所属装备的功能系统或按分组保障设备种类数等。一般情况下，可选择其某种逻辑关系作为划分决策阶段的原则，当情况复杂时，也可选择 2 种或 2 种以上逻辑关系作为决策准则。如可按保障设备所属装备的系统或分系统作为保障设备种类分组的依据，如果装备某系统包含保障设备种类明显多于其他系统，则可将隶属于该系统的保障设备依据保障设备所属专业作为第二逻辑关系进一步划分。

有了决策阶段的划分，还需确定阶段的决策顺序。此时可将各组保障设备种类数按降序进行排列，并按照顺序依次处理。这样做可平衡每个阶段的决策工作量，因为各阶段的决策工作量受之前决策结果(前一阶段可能的最优保障设备种类组合)和当前阶段需要进行决策的保障设备种类数影响。随着决策阶段的推进，决策结果解集合将更加复杂，而按降序排列的保障设备种类数逐阶段降低，因此可实

现决策工作量在每个阶段的均衡。

### 3 多阶段保障设备种类优化过程

多阶段保障设备种类优化的过程包括以下几步：1) 确定保障设备种类优化的目标；2) 划分保障设备种类决策阶段；3) 制定决策策略及各阶段可能最优保障设备种类组合的集合；4) 通过最优目标函数在最后一阶段的状态集中确定最优的保障设备种类组合。过程如图 2 所示。

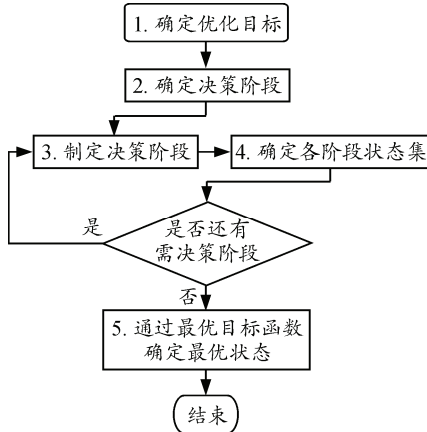


图 2 多阶段保障设备种类优化过程

#### 3.1 确定优化目标

将系统在单位任务时间内的保障设备使用费用 (ECPM) 作为保障设备种类优化的目标<sup>[10]</sup>。在进行多阶段保障设备种类优化过程之前，需要确定所有保障设备的 ECPM 值，计算各保障设备种类组合的累积 ECPM，并将此作为每个阶段决策的基础。

#### 3.2 确定决策阶段

可按第 3 节给出的原则对保障设备种类分组并划分决策阶段。在按阶段确定的每个保障设备分组中，依据所有保障设备具有的功能以及需完成的保障任务，可以建立保障任务需求与保障功能之间的关系。如图 3 所示。

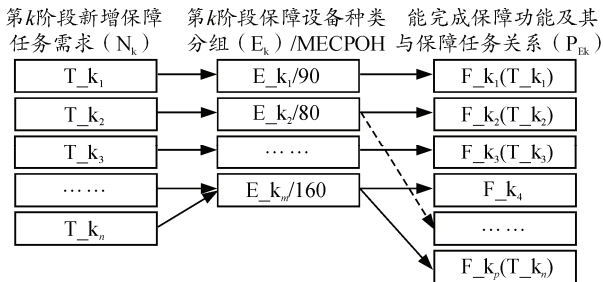


图 3 建立每个阶段保障任务需求、设备、功能之间关系

#### 3.3 制定决策策略

策略是每个阶段排除不可能为最优的保障设备

种类组合 (状态) 的依据或方法。每个阶段的策略由 2 个约束条件组成：

- 1) 每个阶段所有保障设备种类组合 (状态) 需满足该阶段的保障功能要求；
- 2) 对于该阶段中的保障设备种类组合，不存在其他保障设备种类组合，较该组合能实现更多保障功能，且累计 ECPM 比当前组合更小。

比较不同组合实现保障功能多少的基础是明确保障功能之间的等价关系<sup>[10]</sup>。第  $k$  阶段策略为  $\mu_k$ ，可用下式表达：

$$\text{s.t.} \begin{cases} R_k \subseteq P(L) & L \in S_k \\ L = P(L) \subseteq [P(L) \cap f(L) \emptyset], L \neq \emptyset & L, L' \in S_k \end{cases} \quad (1)$$

式中： $P(L)$  代表  $L$  能实现的保障功能； $L$  和  $L'$  代表保障设备种类的组合； $R_k$  代表第  $k$  阶段保障功能需求； $S_k$  代表第  $k$  阶段状态集合； $f(L)$  代表  $L$  的累积 ECPM 值。 $R_k$  的确定方法如下式：

$$\begin{cases} R_k = R_{k-1} \cup N_k & 1 < k < n \\ R_1 = N_1 & k = 1 \end{cases} \quad (2)$$

式中： $n$  为决策阶段数； $N_k$  为第  $k$  阶段新增保障任务清单集合。

#### 3.4 状态集的确定方法

定义状态为能够满足当前阶段保障任务需求的保障设备种类组合。状态集是所有状态的集合，可用下式表达：

$$\begin{cases} S_k = T(S_{k-1}, u_k) & 1 < k < n \\ S_1 = \{L_1\} & k = 1 \end{cases} \quad (3)$$

式中： $n$  代表阶段数； $S_k$  代表第  $k$  阶段经决策后得到的状态集，集合中每一个元素代表一种满足当前阶段保障任务需求的保障设备种类的组合； $S_1$  是第一阶段保障设备种类集合， $S_1$  中有且仅有一个元素  $L_1$ ； $u_k$  代表策略。

$S_k$  的确定过程如下：

设  $S_{k-1} = \{L_{k-1}^1, L_{k-2}^2, \dots, L_{k-1}^m\}$ ；设第  $k$  阶段需决策的保障设备种类分组为集合  $E_k$ 。将  $S_{k-1}$  中的所有元素与  $E_k$  的所有子集 (含  $E_k$  本身) 进行并集运算。得到所有集合组成新的集合为第  $k$  阶段临时状态集合  $S'_k$ 。 $S'_k$  按策略  $u_k$  进行决策后，可得到第  $k$  阶段的状态集合  $S_k$ 。

#### 3.5 最优目标函数

最优目标函数是决策的最后一个阶段 (阶段

n), 根据状态集, 判断最优保障设备清单的方法, 目标函数定义如下:

$$\begin{cases} V_s = \min_{L \in S} f(L) \\ f(L) = \sum_{t \in L} C_{pm}^t \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $V_s$  为最低累计 ECPM;  $S$  为最后一个决策阶段的状态集;  $L$  为  $S$  中的任意元素;  $f(L)$  为计算  $L$  中所有保障设备累计 ECPM 的函数;  $C_{pm}^t$  代表保障设备  $t$  的 ECPM 值。

通过最优目标函数可得具有最低累计 ECPM 值的状态  $L$ , 也就是最终的保障设备种类优化结果。

### 4 示例分析

#### 4.1 示例信息

某装备由 3 个系统构成。各系统包含的初始保障设备清单, 保障任务清单, 初始保障设备能完成保障功能清单及关系如图 4~6 所示。

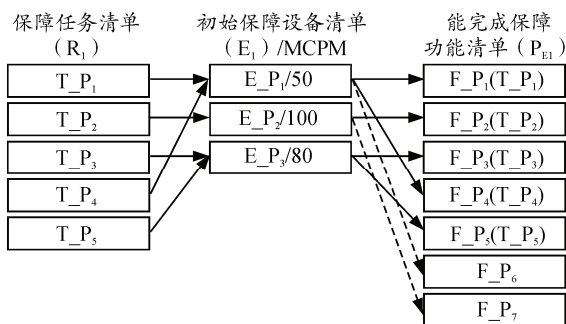


图 4 系统一与保障设备相关信息

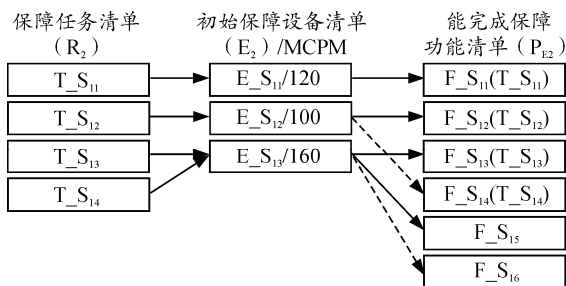


图 5 系统二与保障设备相关信息

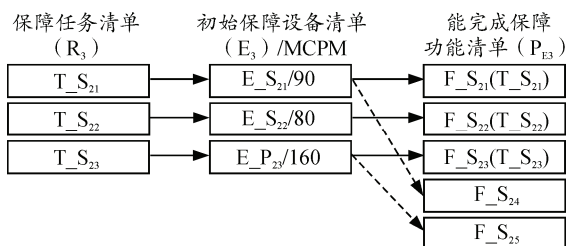


图 6 系统三与保障设备相关信息

具有等价关系的保障功能清单如表 1 所示。

表 1 等价关系保障功能清单

保障功能	等价保障功能
F_P1	F_S11
F_P6	F_S12
F_P7	F_S22
F_S15	F_S23

#### 4.2 多阶段决策过程

将规划过程按装备中系统特点分为 3 个阶段进行决策, 每阶段决策一个系统包含保障设备。

第 1 阶段。

应用系统一的基本信息确定状态  $S_1$ 、 $P$ 、 $R_1$ , 有如下关系:

$$S_1 = \{L_1\} = \{E_{P1}, E_{P2}, E_{P3}\}$$

$$P_{L1} = \{F_{P1}, F_{P2}, F_{P3}, F_{P4}, F_{P5}, F_{P6}, F_{P7}\}$$

$$R_1 = \{T_{P1}, T_{P2}, T_{P3}, T_{P4}, T_{P5}, T_{P6}, T_{P7}\} = \{F_{P1}, F_{P2}, F_{P3}, F_{P4}, F_{P5}\}$$

第 2 阶段。

根据第 1 阶段决策结果和系统二的基本信息确定  $R_2$ 、 $S_2$ 。首先确定  $R_2$ :

$$R_2 = R_2 \cup N_2 =$$

$$\{F_{P1}, F_{P2}, F_{P3}, F_{P4}, F_{P5}\} \cup \{F_{S11}, F_{S12}, F_{S13}, F_{S14}\} = \{F_{P1}, F_{P2}, F_{P3}, F_{P4}, F_{P5}, F_{S12}, F_{S13}, F_{S14}\} \quad (5)$$

$E_2$  的所有子集包括  $\{E_{S11}\}$ ,  $\{E_{S12}\}$ ,  $\{E_{S13}\}$ ,  $\{E_{S11}, E_{S12}\}$ ,  $\{E_{S11}, E_{S13}\}$ ,  $\{E_{S12}, E_{S13}\}$ ,  $\{E_{S11}, E_{S12}, E_{S13}\}$ 。  $S_1$  中的元素  $L_1$  与这些集合进行并集运算, 所得新集合判断其能完成的保障功能( $P$ )是否满足  $R_2$  的要求, 能满足  $R_2$  的集合包括:  $\{E_{P1}, E_{P2}, E_{P3}, E_{S13}\}$ ,  $\{E_{P1}, E_{P2}, E_{P3}, E_{S11}, E_{S13}\}$ ,  $\{E_{P1}, E_{P2}, E_{P3}, E_{S12}, E_{S13}\}$ ,  $\{E_{P1}, E_{P2}, E_{P3}, E_{S11}, E_{S12}, E_{S13}\}$ , 共计 4 个。依据策略  $u$  进行决策, 则  $\{E_{P1}, E_{P2}, E_{P3}, E_{S11}, E_{S13}\}$ 、 $\{E_{P1}, E_{P2}, E_{P3}, E_{S11}, E_{S12}, E_{S13}\}$  一定不为最优, 可排除, 因此第 2 阶段状态集  $S_2$  包含 2 个元素:

$$S_2 = \{L_{21}, L_{22}\}$$

$$L_{21} = \{E_{P1}, E_{P2}, E_{P3}, E_{S13}\}$$

$$L_{22} = \{E_{P1}, E_{P2}, E_{P3}, E_{S12}, E_{S13}\}$$

第 3 阶段。

根据第 2 阶段决策结果和系统三的基本信息确定  $R_3$ 、 $S_3$ , 并计算目标函数  $V_{S3}$ , 从而确定最优保障设备种类清单。

首先确定  $R_3$ :

$$R_3 = R_3 \cup N_3 =$$

$$\{F_{P1}, F_{P2}, F_{P3}, F_{P4}, F_{P5}, F_{S12}, F_{S13}, F_{S14}\} \cup \{F_{S21}, F_{S22}, F_{S23}\} = \{F_{P1}, F_{P2}, F_{P3}, F_{P4}, F_{P5}, F_{S12}, F_{S13}, F_{S14}, F_{S21}, F_{S22}, F_{S23}\} \quad (6)$$