

基于多目标优化的装备群备件保障决策研究

李亚, 赵建民, 许长安
(军械工程学院, 石家庄 050003)

摘要: 针对装备群备件保障决策问题, 从装备群-装备两个层次进行分析建模和优化。首先, 根据可靠性分配方法将装备群系统可靠性分配给各装备子系统, 在此基础上, 考虑总费用和保障概率的要求, 利用pareto多目标优化方法对各子系统装备所需携(运)行的备件进行合理优化, 建立一个多目标优化决策模型。最后结合应用实例展开应用研究, 可为装备群系统决策从定性到定量提供一种新的思路。

关键词: 装备系统; 可靠性分配; pareto最优解; 多目标优化

中图分类号: TJ07 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2012)04-0092-04

Research on Support Decision of Spare Parts in Equipment Group Based on Multi-objective Optimization

LI Ya, ZHAO Jian-min, XU Chang-an
(Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: Aiming at the problem of support decision of spare parts in equipment group, modeling and optimization was carried out from the levels of equipment group and equipment. The reliability of equipment group was assigned to single equipment according to reliability allocation method. Based on this, considering requirements of total cost and support probability, using the pareto multi-objective optimization methods in various subsystem and equipment required, a multi-objective optimization decision making model was established. Applied research was carried out with application examples. The purpose was to provide a new way of thinking from qualitative to quantitative for the decision making of equipment system.

Key words: equipment system; reliability apportionment; pareto dominance; multi-objective optimal

备件保障资源优化配置研究一直是维修保障领域的热点问题, 国内外学者已经作了大量研究。Dinesh等^[1]使用更新过程研究了基于可用度的备件优化模型, 计算了部件寿命服从不同分布的可用度。Zhao^[2]研究了一般维修条件下可修备件系统的

建模问题。郭继周等^[3]研究了多个并行并联的作战单元的优化模型。这些都是针对单目标条件下备件的优化配置。

然而, 科学研究和工程实践中许多优化问题大都是多目标优化问题。与单目标优化问题的本质区

收稿日期: 2012-02-16

作者简介: 李亚(1987—), 男, 河北邢台人, 硕士研究生, 主要研究方向为维修工程理论与运用。

别在于,多目标优化问题的解不是唯一的,而是存在一个最优解集合,集合中元素成为pareto最优^[4]或非劣最优(non-dominated)。

文中以装备系统为研究对象,将装备系统可靠性分配给各子系统(装备单元),研究每一个装备部件的优化配置,考虑单个装备部件为串联关系,建立以经费和风险为目标的多目标优化模型,利用pareto最优解进行合理配置。

1 问题的描述及假设

决定装备群系统任务成功的重要因素是装备中某些外场可更换部件(Line Replaceable Unit, LRU)的备件满足水平。

假设某系统由*i*类装备组成一个装备群系统,系统的可靠性为 R_s^* ,每一类装备由 M_i 类LRU组成,每类LRU数量为1个,互相之间为串联关系。每一类LRU备件故障率为 λ_{ij} ,数量为 X_{ij} ,单价为 C_{ij} 。任务期间备件携行量 $X=(X_1, X_2, X_3, \dots, X_{M_i})^T$, $C_i=(C_1, C_2, C_3, \dots, C_{M_i})$,任务时间为 T_s 。问题是在低于一定风险和一定费用的基础上,求装备群系统中单个装备的最优的备件携(运)行量。假设如下:

- 1) 备件寿命服从指数分布;
- 2) 备件在储存期内不会发生故障;
- 3) 任务期间内备件无补充;
- 4) 考虑的部件均为不可修件;
- 5) 不同备件更换时间相同。

2 模型的建立和方法的提出

一个装备群系统可以按装备级、部件级、零件级等逐渐展开,如图1所示。

对于此装备群系统,采用结合AGREE法^[5],将实际装备环境中的环境、维修、标准化、元器件质量等对可靠性分配有影响的因素考虑进去。这种新的可靠性分配法^[6]不仅考虑到装备系统制造中各装备部件标准化、维修和元器件质量对装备可靠性分配的影响,而且考虑到了理论分析计算中装备重要度、复杂度对单元可靠性分配的影响。

对于装备群系统服从指数分布的串联结构模型系统,第*j*个分系统的可靠性为:

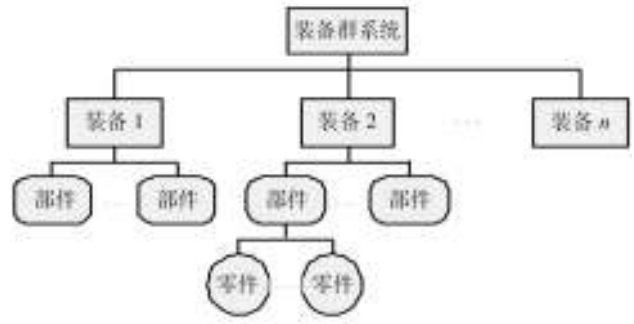


图1 系统的分解

Fig. 1 Exploded view of the system

$$R_j = [R_s(t)] \prod_{i=1}^n K_{ji} \prod_{j=1}^n \prod_{i=1}^n K_{ji} \quad (1)$$

两边取对数得:

$$\ln(e^{-\lambda_j t_j}) = -\lambda_j t_j =$$

$$\frac{\prod_{i=1}^n K_{ji}}{\sum_{j=1}^n \prod_{i=1}^n K_{ji}} \cdot \ln(e^{-\lambda_j t_j}) = \frac{\prod_{i=1}^n K_{ji}}{\sum_{j=1}^n \prod_{i=1}^n K_{ji}} \cdot (e^{-\lambda_j t_j}) \quad (2)$$

推导出其分配公式如下:

$$\lambda_j = \frac{\prod_{i=1}^n K_{ji}}{\sum_{j=1}^n \prod_{i=1}^n K_{ji}} \cdot \frac{t_s}{t_j} \cdot \lambda_s \quad (3)$$

式中: λ_s, λ_j 为系统、第*j*个装备的故障率; K_{ij} 为第*j*个单元、第*i*个分配的加权因子。通常考虑的加权因子有重要因子、复杂因子、环境因子、标准化因子、维修因子和元器件的质量因子。

分配给各系统的可靠度为:

$$R_j = e^{-\lambda_j t_j} = e^{-(\prod_{i=1}^n K_{ji} / \sum_{j=1}^n \prod_{i=1}^n K_{ji}) \lambda_s t_j} \quad (4)$$

各系统的风险约束上限为:

$$V_j = 1 - R_j = 1 - e^{-(\prod_{i=1}^n K_{ji} / \sum_{j=1}^n \prod_{i=1}^n K_{ji}) \lambda_s t_j} \quad (5)$$

将式(5)作为多目标优化问题的一个约束条件。考虑其中一个装备系统,装备系统中各部件为串联关系,而每个部件为一个冷储备系统。以费用 $f_1(X)=C \cdot X^T = \sum_{i=1}^M C_{ij} X_{ij}$ 和风险 $f_2(X)=$

$1 - \prod_{i=1}^M \sum_{j=1}^{X_i} \frac{(\lambda_i T_s)^j}{j!} \cdot e^{-\lambda_i T_s}$ 为目标函数,建立下面多目标模型^[7]:

$$V - \min_{x \in X} f(x) = (f_1(x), f_2(x))^T$$

$$\begin{cases} V \leq V_j \\ C = \min(\sum C_{ij} X_{ij}) \end{cases} \quad (6)$$

V_j 作为风险指标的一个约束条件,要求费用最小,假定各种装备的LRU给出,利用式(6)对系统进行建模。

3 案例分析

假设以某机械化步兵旅去参加某一个演习任务为研究对象,其装备主要由保障装备(修理车、通信车)和主战装备(装甲车)组成。假定装备群系统的可靠性为0.9,每个装备的备件不多于2个,时间为100 h。求某机械化步兵旅在任务期间各装备子系统的LRU最优备件携行量。

3.1 系统可靠性分配计算

系统是由修理车、通信车、工程车、装甲车和坦克组成。系统中各种因素的加权因子是以修理车为标准装备,取其加权因子为 $K_{ji}=1$,然后将其他装备与标准装备相比较。根据经验,选取相应装备的加权因子。

由于系统的可靠性模型为串联模型,根据以往经验得各类装备的重要度因子 K_{j2} ,见表1。复杂度 C_j 定义为装备中所含的重要零件、组件(其失效会引起装备失效)的数目 N_j 与系统中重要零件、组件总数 N 之比,即第 j 个装备的复杂度。其公式如下:

$$C_j = \frac{N_j}{N} = \frac{N_j}{\sum_{j=1}^N N_j}, j = 1, 2, \dots, N \quad (7)$$

由此,可以计算系统中各个装备的重要组件数 N_j ,各装备的复杂度 C_j 和各装备的复杂度因子 K_{j1} 。计算结果见表1。

环境因子 K_{j3} 一般包括温度、湿度、振动和冲击。不同的环境条件,对可靠性的影响也是不同的,恶劣环境条件的设备,分配的可靠性指标应该低一些,环境因子应该大一些。标准化因子 K_{j4} 、维修因子 K_{j5} 及元器件质量因子 K_{j6} ,都可以先定性分析。对标准高的元器件,质量高的、维修比较方便的单元和分系统,指标可以分配得高一些,加权因子分配得比较低;

表1 初始数据

Table 1 Initial data

装备名称	LRU数 n_i	复杂度 C_j	复杂度因子 K_{j1}	重要度因子 K_{j2}
修理车	3	3/17	1	0.2
通信车	3	3/17	1	0.5
装甲车	3	3/17	1	1

反之,指标分配得低一些,加权因子分配得比较高。系统各装备加权因子的分析计算结果见表2。

表2 系统中各装备的加权因子

Table 2 Weighting factors of equipments in the system

装备名称	K_{j1}	K_{j2}	K_{j3}	K_{j4}	K_{j5}	K_{j6}
修理车	1	1	1	1	1	1
通信车	1	1	1	1.1	1	1
装甲车	1	1	1	1	1.2	1

在装备群系统执行作战任务时,由于每个装备都是同时进行的,所以时间都为 t_s ,系统的平均故障时间的规定值为100 h。对系统中每个装备进行可靠性分配,由式(4)和式(5)分别求出每个装备的可靠度 R_i 和每个装备的风险约束上限 V_j :

$$R_1=0.9635, R_2=0.9695, R_3=0.9816$$

每个装备的风险为 V_i :

$$V_1=0.0365, V_2=0.0305, V_3=0.0184$$

3.2 优化分析

初始数据见表3。

表3 初始数据

Table 3 Initial data

装备种类	LRU编号	LRU单价/万元	LRU故障率
修理车	1	1	0.003
	2	2	0.002
	3	3	0.001
通信车	4	3	0.002
	5	1	0.003
	6	3	0.002
装甲车	11	1	0.003
	12	4	0.002
	13	5	0.001

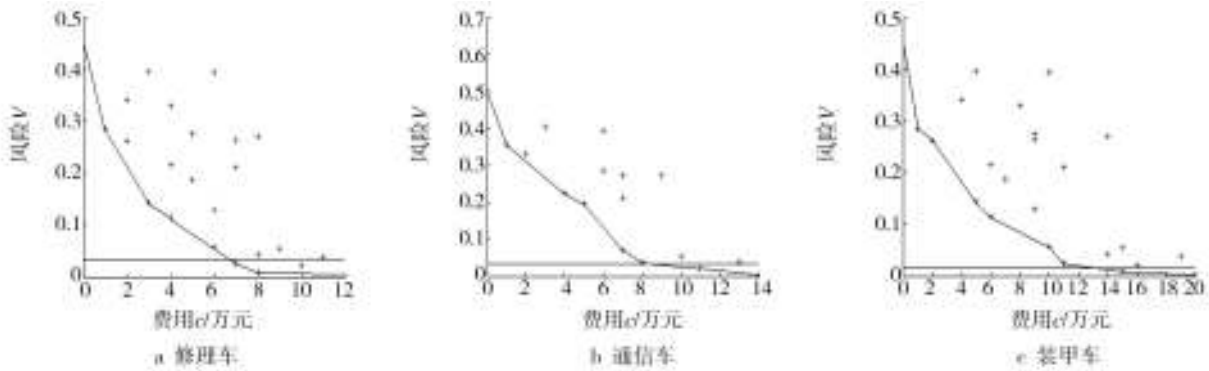


图2 Matlab生成的3类装备备件携运量

Fig. 2 Carrying amount of three type of equipment spare parts generated by Matlab

将3类装备的LRU分别建立一个串联系统,对单个装备的LRU进行优化分析,建立装备系统费用和 risk 模型解析式,见式(6),在假定给出各种LRU的备件携行量为(0,2)情况下,考虑费用为目标时,费用越小,方案越优。

通过 Matlab 软件计算(如图2所示),得到了相应的风险和总费用。在满足装备群系统分配给各装备的风险约束条件下,从图2中得到pareto最优的LRU携行量方案。图2中实线(风险上限)下面的点都满足要求,利用风险费用比增值进行优化,得到最优的备件携行方案,以及每一种装备的最优携行量,见表4。

表4 备件的最优携行量

Table 4 The best carrying amount of spare parts

装备种类	风险 V_i	总费用 C_i /万元	最优备件携行量 X_i
修理车	0.0365	7	[2 1 1]
通信车	0.0305	11	[2 2 1]
装甲车	0.0184	15	[2 2 1]

4 结论

将装备群系统任务中各装备部件结构定义为串联系统多目标优化模型,着重研究了串联结构在装备系统中携运备件优化配置建模,并运用pareto最优方法进行求解。通过具体实例,得到了装备群系统中各装备的最优备件携行方案,同时也针对单个装备系统在出现问题时,有效地解决了备件单元的携

行问题。该研究为复杂装备群系统的维修保障能力评估和资源优化配置技术提供了理论研究基础。在今后的研究过程中,将针对LRU为可修的情况,开展面向复杂武器系统作战任务的维修保障资源优化配置研究。

参考文献:

- [1] DINESH K U, KNEZEVIC J. Availability Based Spare Optimization Using Renewal Process[J]. Reliability Engineering and System Safety, 1998, 59(5): 217—223.
- [2] DAMANTIOS A M, ZHAO W B. Modeling and Analysis of Repairable Systems with General Repair[C]//2005 Proceeding Annual Reliability and Maintainability Symposium. USA, 2005: 24—27.(余不详)
- [3] 郭继周, 张建军, 郭波, 等. 多个并行并联的作战单元的优化配置建模[J]. 火力指挥与控制, 2008, 33(2): 26—29.
- [4] 陈柳, 周伟, 张国平. 一种基于树结构排序的多目标优化演化算法[J]. 计算机工程与应用, 2005, 31(2): 90—94
- [5] 甘茂治, 康建设, 高崎. 军用装备维修工程学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [6] 张倩倩, 黄清清, 张艳秋, 等. 基于指数分布的可靠性分配方法研究[J]. 舰船电子工程, 2010, 30(3): 151—154.
- [7] 胡毓达. 多目标规划理论[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1994.