

综 述

备件优化理论分析与应用研究

张蕊, 袁立峰, 汪凯蔚

(工业和信息化部电子第五研究所, 广州 510610)

摘要: 备件是综合保障工作的重要内容,是影响战备完好性的重要因素。备件优化就是在有限的经费支持条件下,最大限度使区域乃至全局武器系统战备完好性达到最优化。备件优化工作是建立在对武器系统保障模式、使用维修模式充分了解的基础上进行的。对多维修、多层次保障下备件优化进行理论分析,并利用 OPUS10 软件对陆航某型机组成的区域武器系统进行了应用分析。

关键词: 备件; 优化; 维修; OPUS10

中图分类号: TJ307 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2012)05-0052-04

Analysis and Application Research of Spare Parts Optimization Theory

ZHANG Rui, YUAN Li-feng, WANG Kai-wei

(The 5th Electronic Research Institute of Ministry of Industry and Information Technology, Guangzhou 510610, China)

Abstract: Spare parts are important content of supportability, which exerts much influence on operational readiness. Spare parts optimization is to maximize operational readiness locally and globally depending on limited financial support. Spare parts optimization is based on abundant comprehension to armament system supportability model and maintenance model. Spare parts optimization theory under multi-maintenance and multi-layer supportability was analyzed. The application of the theory was analyzed by taking the region armament system of certain type army navigation aircraft as an example by using OPUS10 software.

Key words: spare parts; optimization; maintenance; OPUS10

现代战争条件下,胜负的决定因素之一是战争的保障能力。备件是综合保障重要内容,是保证战争持续力的重要条件。在有限的战争资源条件下,如何更加合理地分配和储备备件是取得战争胜利的重要因素。因此,在经费一定的条件下,合理优化资源,最大限度提高战备完好性是综合保障工作的重要内容。备件优化理论就是建立在有限资源条件下

更好地提高战备完好率这一前提基础上的。

1 理论分析^[1]

由于外军维修机构的设置一般采用多级结构,相应的备件库存也是多级配置和管理的,为更科学合理地计算备件库存量,以美国为代表的国家对多

收稿日期: 2012-04-05

作者简介: 张蕊(1979—),女,陕西西安人,硕士,工程师,主要从事军工电子产品可靠性试验技术研究。

级备件管理系统进行了深入地研究。Sherbrook 是最早对多级库存系统进行专门研究的学者之一。在探索了多级库存系统备件需求规律及系统目标函数等理论问题的基础上,针对多级备件库存供应这一典型实际问题,建立了 METRIC 模型。该模型是多级库存系统的首次实际应用,后来发展成为美军及其盟军飞机的可用度模型。Simon 对多级库存系统作了一些简化,从而导出了系统模型的精确解。考虑到备件多渠道采购的实际情况,Muckstadt 对 METRIC 模型进行了进一步的扩展,给出了多项目、多订单情况下的系统模型。Slay 研究了系统优化计算问题,提出了 VARI-METRIC 模型,该模型较以前的模型更易计算求解。Graves 用很简单的方法推出了 VARI-METRIC 模型,并通过数学仿真研究了该模型的精度。文中的理论就是建立在 VARI-METRIC 模型基础上,针对无维修限制条件进行分析研究。

1.1 单一部件一级维修模式

无维修限制即不考虑维修点本身的服务能力与规则。首先假设只有一级维修(即只有一级维修点和仓库),系统(装备)故障分解到 LRU(外场可更换单元),如图 1 所示。当故障件到达维修点(维修点有备件仓库)的同时,仓库备件将为此故障件更换新件。如果仓库有备件并可用,那么这个备件就立即替换故障件。假设更换时间是可以忽略的,这样系统就不存在停机时间。然而,如果这个维修点的备件已经用完,所需要的备件正在订购,那么系统(装备)就会临时停机直到新部件可用(维修完毕或订购完成)。

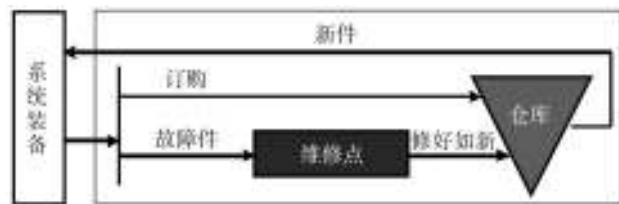


图1 一级维修单部件维修流程

Fig. 1 Single-level and single-assembly maintenance procedure

故障件进入维修点,在这里它有可能需要等待一段时间才能维修。维修以后,假设部件具有和新部件一样的属性。如果故障件不可修,就要报废,需

要订购新部件。这样,整个系统流程中的备件数目是不变的。

当新部件进入到仓库(维修完好或外购),就要先送到需要这个部件的系统(按先到先服务的原则),相应的系统开始工作。如果没有需要此部件的系统(装备),该部件将会存入备件仓库。

1.2 单部件多级维修模式

将上面最简单的情形拓展一下,考虑单部件多级维修的情况。故障件进入基层级维修点,或者进入中继级、基地级的维修点进行维修。通常,如果基层级维修点由于技术上的原因或没有足够的设备、技能而不能维修时,就要送到高一级的地点。如果在高一级的地点也不能维修,就要被送到其它地点(不在维修级别划分范围内的地点)进行维修或更换。这种情况下把送到其它维修点进行维修或更换的结构模型作为一个黑盒子处理,只计算这个过程的时间。

如果在基层级的仓库备件是可用的,通常会替换故障件,反之就要订购。如果故障件被送往高级维修点,就要发布一个为基层级仓库补充这个项目的订单。这样,所有基层级仓库中的备件存货(库存+维修中的项目+订单-缺货)数目保持不变。如果高一级的维修点没有足够的存货,这个项目就会处于缺货状态直到维修完毕。当一个部件从维修点或高一级的地点补充到达基层级时,它就会用来满足一个缺货。

1.3 一级维修多层次模式

考虑一级维修和故障拓展到 SRU(内场可更换单元)的情形,如图 2 所示。系统中一个产品的故障是由其中一个部件引起的(对于维修来说,更换这个部件即可),或者没有明确引起这个产品故障的部件(这个产品必须维修,即归为 LRU 的情况)。在第二种情况下,过程和上面的流程是相同的。在第一种情况下,产品被分解,引起故障的子部件被送修。同时,产品被仓库中一个可用的备用产品来替换。如果仓库中没有这个产品的备件,就是缺货。这个被分解的产品需要一个子部件。如果库存中新的子部件是可用的(修好或订购),这个项目就要装配起来,在产品级上补充缺货。

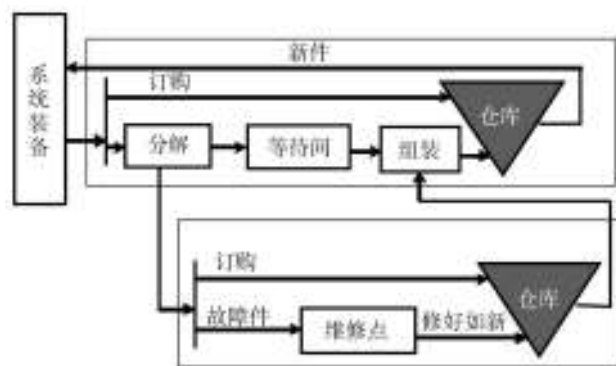


图2 一级维修多部件维修流程

Fig. 2 Single-level and multi-assembly maintenance procedure

1.4 多维修多层次模式

综合图2与图3两种情况,研究多级维修和故障拓展到SRU的情况,如图3所示。一般情况下故障件从使用地点到一个维修点,可能会经由没有维修能力的低级维修点。故障件由相应拥有可用备件的低级地点仓库来更换,其备件存货总量需要补充。这个流程与上面讨论的第一种情况一样。下一步,判别故障及故障件送到维修点或部件本身进入维修程序,按照第二种情况的流程进行。

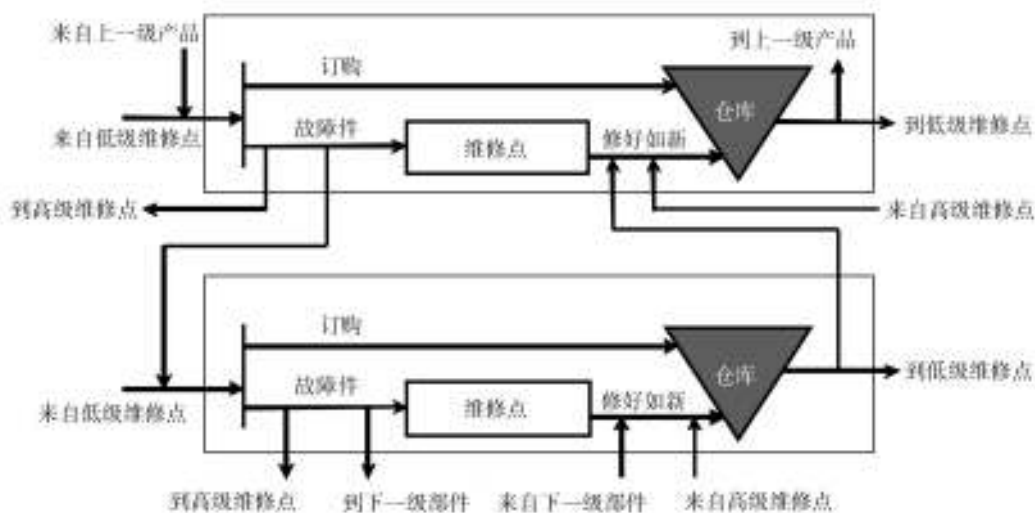


图3 多级维修多部件维修流程

Fig. 3 Multilevel and multi-assembly maintenance procedure

费用。

算法: 1)首先设所有的部件 $S_k=0, b=0$; 2)找到使式(3)成立的部件 k , 则 $S_k=S_k+1, b=b+C_k$; 3)重复进行

1.5 备件优化模型^[2]

备件优化时,考虑两个变量即最小费用和最大可用度。这个可用度可表示为:

$$A = \frac{t_{MTBM}}{t_{MTBM} + t_{MSD}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: t_{MTBM} 为维修间隔时间; t_{MSD} 为供给延迟,即由备件的不可用性引起的系统停机时间。由式(1)可以看出, t_{MTBM} 在一定程度上的恒定性,最大的可用度与最小的备件延迟时间是等价的。而备件延迟时间是由缺货引起的,因此,最大可用度的问题最后归结为最小缺货率的问题,即在费用一定的情况下,保证最小的缺货率,便能达到备件优化的目的。对于有 K 个LRU部件的一级维修系统来讲,备件优化问题可用式(2)表示。

$$K(b) = \begin{cases} \min \sum_{k=1}^K B_k(S_k) \\ \text{s. t.} \quad \begin{cases} \sum_{k=1}^K C_k \cdot S_k \leq b \\ S_k \geq 0, k \text{ 为整数} \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

式中: S_k 为部件 k 的备件数; B_k 为部件 k 的缺货率; C_k 为部件 k 的单价; b 为购买费用; C 为预算总

第2步,直到满足费用约束条件 $b \leq C$ 。

$$\max \left| \frac{B_k(S_k + 1) - B_k(S_k)}{C_k} \right| \quad (3)$$

其中,

$$\begin{cases} B_k(S_k + 1) = B_k(S_k) - R_k(S_k + 1) \\ B_k(0) = E(X_k) = [X_k \sim Po(\lambda_k t_{MTTR,k})] = \lambda_k t_{MTTR,k} \\ R_k(S_k + 1) = R_k(S_k) - P(X_k = S_k) \\ R_k(0) = 1 \\ P(X_k = n) = \frac{(\lambda_k t_{MTTR,k})^n}{n!} e^{-\lambda_k t_{MTTR,k}} \end{cases} \quad (4)$$

式中: R_k 为部件 k 备件缺货风险率; $t_{MTTR,k}$ 为部件 k 平均修复时间; P 为备件维修概率(服从泊松分布)。式(4)的推导过程从略。对于多部件多维修地点的系统来讲,研究的方法路线与前文所述相同,但过程比较复杂。

2 OPUS10软件

OPUS10是建立在多级库存理论基础上的备件优化软件,运用VARI-METRIC算法进行保障性优化分析,该软件在进行备件优化分析方面具有较高的精度。该模型在进行备件优化方面可以解决以下几个方面的问题,包括初始备件优化、备件补给优化、备件的重新配置、备件的补给以及重新配置。针对目前装备的实际需求可以给出不同类型的备件优化分析。

2.1 备件优化需要输入的信息

进行备件优化分析的基础是必须有充足的装备使用信息。大体来说信息主要归纳为以下几类:

- 1) 关于装备任务及部署的信息。包括装备的数量、地理部署、利用率、寿命等。
- 2) 关于装备系统的信息。包括装备的构型、单元的类型(可维修件、不可维修件、可部分维修件、外场可更换单元、内场可更换单元等)、单元的可靠性维修性参数、系统的可靠性维修性参数、预防性维修的信息。
- 3) 关于维修保障体制和资源的信息。包括维修保障体制(二级或三级)、维修机构的级别/数量/地理位置和相互之间的关系、库存的级别/数量/地理位置和相互之间的关系、维修机构的资源配置、维修机构的维修能力、维修和库存策略。
- 4) 关于维修保障费用的信息。包括利率、维修

工时、维修人力费用、备件的费用、运输费用、储存费用、其它保障资源的费用。

2.2 备件优化的输出信息

将上面提到的数据信息作为OPUS10模型的输入数据,通过运算分析,给出一系列的备件解决方案,每种方案都对应着不同备件配置方案以及不同的系统使用可用度和寿命周期保障费用。具体来说,每种解决方案都给出系统的 t_{MTBF} (平均故障间隔时间)、 t_w (等待备件的时间)、 t_{MD} (系统平均停机时间,包括平均维修时间、等待备件时间、管理延误时间、等待人员/工具/资料等资源的时间)、AO(使用可用度)、LSC(寿命周期保障费用)等重要参数以及备件配备的地理位置和数量,另外对于不可维修件和部分可维修件,系统解决方案给出了再采购周期、再采购点以及再采购数量。用户可以根据不同的需求和约束条件选择不同的解决方案。

3 实例分析

下面就某型直升机在几个基地配置执行任务为例,给出整个战备系统10a所需的备件优化配置。

将直升机分解到LRU,部分LRU可继续分解为SRU,建立结构树;将直升机的分布情况信息和维修点信息建立装备分布与流动树;将以上信息及各LRU或SRU的可靠性信息(故障率等)、维修信息、费用信息等一并输入到OPUS10软件,建立计算结构,如图4所示。



图4 计算结构

Fig. 4 Calculation structure

(下转第78页)

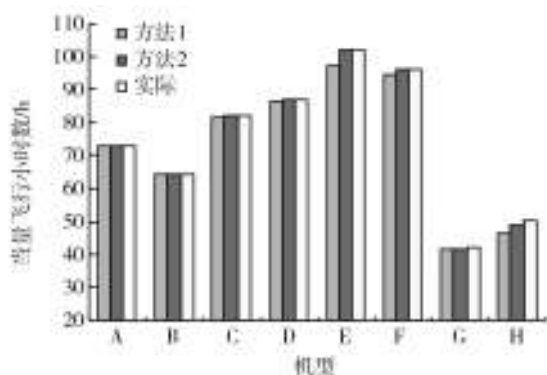


图2 各机型当量飞行小时数

Fig. 2 Equivalent flight time of different aircraft types

时间不会太长,因此方法1很难计及其影响,从而造成损伤的结果与实际情况相差较大。此外,在飞机着陆过程中也容易产生较大的过载,如果没有计及这一部分载荷历程,也会对最后的损伤值产生一定的影响。不难看出,通过方法2计算飞行时间后再计算损伤,其结果与实际情况基本吻合。

损伤计算值的误差将会直接影响到对当量飞行小时的计算。图2中可以看出,误差最大的是E型机,半年中方法1的计算结果与实际当量飞行小时数相差达4.33 h,而方法2的结果基本与实际情况相当,这也充分证明了其合理性。

3 结论

1) 从冗长的FPR数据中提取出飞行时间段是

单机寿命监控的首要工作。如果时间段过长将会增加数据处理量,降低计算效率,而时间段过短则可能会影响计算精度。文中提出的采用地速结合发动机转速的判断准则较好地解决了这一问题。

2) 对于经常使用加力起飞或起降性能一般的飞机而言,飞行时间确定不准将有可能使产生较大损伤的载荷历程缺失,因此合理确定飞行时间对于飞机损伤计算结果的影响不可忽略。

参考文献:

- [1] 何宇廷. 基于飞机结构寿命包线的飞机结构单机寿命监控[J]. 中国工程科学, 2006, 8(6): 23—27.
- [2] 石荣, 李郑琦, 王学德, 等. 飞机结构日历寿命研究现状及关键问题[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2008, 28(6): 381—384.
- [3] 张福泽. 飞机日历翻修期与总日历寿命确定方法和预计公式[J]. 航空学报, 2005, 26(4): 458—460.
- [4] 陈志伟, 朱青云, 薛军, 等. 战斗机单机寿命监控中起飞重量的影响[J]. 航空学报, 2009, 30(4): 678—682.
- [5] 张泰峰, 孙文胜, 杨晓华. 飞机结构单机寿命监控中的几个关键问题的研究[J]. 装备环境工程, 2011, 8(6): 6—9.
- [6] 刘文琰. 单机寿命监控技术指南[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [7] 王智, 刘文琰, 王磊. 单机结构疲劳分散系数研究[J]. 机械强度, 2009, 31(1): 150—154.

(上接第55页)

经OPUS10运算,可以得到系统的备件优化清单,包括各LRU或SRU采购及在各个装备点库存单等信息。

4 结论

通过理论分析与实例可以看出,备件优化可以大大减少部分组件的库存量,同时将平时易耗损件的备量保持在一定水平,保证了飞行任务的完成;可解决由于缺货的原因而造成部队为完成任务可进行横向

串件的问题;可提前预测重要部件的备件量,解决关键部件在不能及时得到维修的现状,消除目前借拼装来完成任务的问题。备件优化是保障战备完好性的重要手段,它的研究必将促进综合保障的发展。

参考文献:

- [1] 徐廷学. 基于备件库存的舰炮使用度建模与仿真[J]. 装备环境工程, 2010, 7(5): 132—137.
- [2] 章国栋. 系统可靠性与维修性的分析与设计[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1990.