考虑保障设备故障的装备维修保障模型

王 严 马 麟 文 佳 康 锐

(北京航空航天大学 可靠性与系统工程学院, 北京 100191)

摘 要: 为分析保障设备故障及其保障过程对装备保障效能产生的影响,分析了保障设备故障对装备保障活动的影响,详细描述了保障设备在站点间、站点内的保障过程,建立了保障设备站点内的保障过程模型,提出保障设备故障影响等级、附加保障活动等参数来体现保障设备故障对维修活动产生的影响. 在此基础上建立了考虑保障设备保障过程的装备维修保障仿真模型,并与传统仿真模型进行对比,通过具体案例分析得出保障设备的保障对装备保障效能的影响. 为开展保障设备的保障工作,进行保障设备可靠性维修性参数设计提供了有效的支持.

关 键 词: 系统工程; 后勤; 仿真; 可靠性; 保障设备

中图分类号: TB 114.3

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2012)01-0123-05

Maintenance-support model of materiel considering support equipment failure

Wang Yan Ma Lin Wen Jia Kang Rui

(School of Reliability and Systems Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: To analysis the impact of failure and logistics of support equipment bringing on the materiel support efficiency, the effect of support equipment failure resulting in maintenance tasks and the logistic process of support equipment in depots and between depots was described, a model of logistics process of support equipment in a depot was set up. New parameters such as effect rank and additive maintenance task was put forward in order to measure the impact of support equipment failure. A simulation model describing materiel support process considering the logistics of support equipment was set up in comparison with traditional simulation model. useful method was provided in carrying on logistics of support equipment and putting forward reliability and maintainability requirement.

Key words: system engineering; logistics; simulation; reliability; support equipment

保障设备作为综合保障的十大要素之一,在装备保障过程中起到不可或缺的作用. 在保障系统高机动性,高效费比的要求下,保障设备也相应的趋于多功能、一体化. 这必然对减少保障设备数量配置、降低保障规模起到促进作用,但与此同时,当保障设备发生故障时,保障活动受到的影响也是比较严重的. 所以保障设备的故障影响和保障过程也越来越受到型号单位的重视.

在现有对保障系统维修过程建模,保障系统效能和保障设备的数量预测研究成果中[1-5]都假定保障设备是完好不坏的. 这就掩盖了保障设备故障对维修保障过程的影响,增加了保障隐患. 同时没有相关文献针对保障设备的故障影响和保障过程作出研究,没有合理的方法支持保障设备的可靠性维修性参数设计. 这就要求必须对保障设备故障的保障过程及其影响展开研究,提出切实合理的保障设备可靠性维修性参数的确定方法.

本文首先从保障设备保障的角度对保障设备

收稿日期: 2010-09-18; **网络出版时间**: 2012-01-06 15:11; **DOI**: CNKI:11-2625/V.20120106.1511.012

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20120106.1511.012.html

作者简介: 王 严(1985-),男,吉林长春人,硕士生,wang_yan2006@163.com.

进行分类,分析保障设备故障对装备保障活动的影响,描述了保障设备的保障过程,在此基础上建立了考虑保障设备保障过程的装备维修过程仿真模型,并与传统仿真模型进行对比,得出保障设备故障对装备保障效能的影响. 为保障设备的保障开展和保障设备可靠性维修性指标的确定提供了技术支持和理论基础.

1 保障设备的保障过程分析

1.1 保障设备分类

为了进行保障设备的保障,首先需要按照保障设备故障模式和所需保障活动的角度对保障设备进行如下的分类,如表1所示. 第一类为磨损类机械设备,发生的故障大多属于疲劳磨损. 此类设备成本相对较低,磨损破坏严重时直接废弃;第二类为通用电子设备,维修较为简单,站点内配置若干消耗品和备件,出现故障后可以直接进行更换维修;第三类为复杂的保障设备,其构造复杂,使用与维修过程较为复杂,成本高昂,配备数量有限,需要进行日常的使用保障.

表1 保障设备分类

保障设备类别	常见设备	进行保障活动
磨损类机械设备	钳子、扳子	直接废弃
简单电子设备	电压表、万用表	简单的维修保障
复杂设备	大型测试设备、牵引设备	使用保障、维修保障

1.2 站点间保障设备保障过程

保障设备的保障是在保障系统内进行的. 在保障设备的维修保障过程中,可更换组件只在保障设备所在的本级站点和基地级站点之间流动,如图1所示. 中继级站点不具备修复外场级保障设备的能力,外场或中继级站点中保障设备在各站点只进行简单的更换维修,更换下故障组件需要返回基地级站点进行维修,待修复后再返回保障设备所在的站点. 保障设备一般由转承制方来负责研制,所以在基地级也一般由转承制方来进行保障设备故障组件的维修.

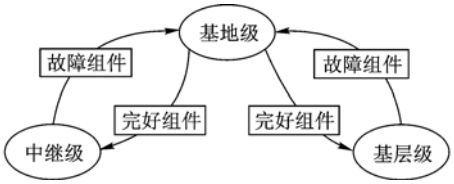

图1 站点间保障设备修复过程

1.3 站点内保障设备使用及保障过程

保障设备在站点内的使用及保障过程,如图2所示. 某些复杂保障设备需进行预防性维修,结束后保障设备返回待命状态. 当产生使用要求时,首先判断保障设备是否需要进行使用保障,在保障设备的使用过程中,需要判断保障设备是否故障,如果出现故障首先要判断是否有可替换保障设备,存在可替换保障设备的情况优先替换保障设备,进行装备的维修,不存在可替换保障设备则需要对故障设备进行送修,待有保障设备状态转变为待命状态后才能继续进行装备维修. 对于进行送修的保障设备,根据不同的保障设备类别选择是进行修复性维修还是直接选择废弃. 在保障设备的保障过程模型中,保障设备主要包括4种状态:保障设备待命状态、保障设备占用状态、保障设备维修保障状态、保障设备的废弃状态. 其中,废弃状态主要针对磨损消耗类保障设备.

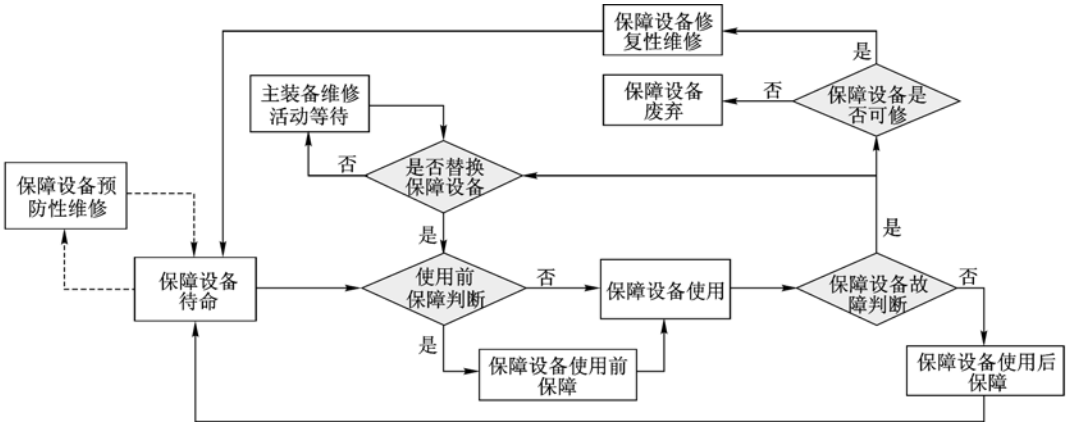

图2 保障设备的保障过程模型

2 保障设备保障过程影响分析

2.1 保障设备故障对装备保障活动影响

在保障设备FMEA(Failure Mode and Effect Analysis)结果的基础上,从保障设备故障对装备保障活动影响的角度来进行分析,引入影响等级和附加保障活动两个参数. 影响等级用来表示保障设备故障对装备保障活动影响的程度,附加保

障活动用来表示当保障设备发生故障之后,需要额外执行修复故障影响的维修活动数量. 在此基础上把保障设备的故障模式分为 3 类,如表 2 所示. 影响等级 1 导致装备保障活动暂停,待更换保障设备或保障设备修复之后,可以在原维修活动进行的基础上继续进行,不产生附加保障活动. 例如在口盖拆卸时,所用电钻出现故障,更换电钻后可在原保障活动的基础上继续进行,原保障活动时间不变;影响等级 2 导致所进行维修活动失效,需要重新进行,保障设备故障前所进行的(0 ~ 1)的装备保障活动成为附加保障活动. 例如检测仪死机后造成该次检查结果失效,需要重新进行;影响等级 3 导致装备组件损坏,将产生附加(1 ~ K)的保障活动来修理故障组件,K 根据不同保障设备故障的危害程度而异. 例如进行充电时,充电车短路可能会损坏装备组件,导致该组件维修需求的产生.

表 2　保障设备故障影响

影响等级	影响后果	产生概率	附加保障活动
1	装备维修活动暂停	α	0
2	装备维修活动重新开始	β	0 ~ 1
3	产生额外装备维修活动	γ	1 ~ K

2.2　保障设备故障对装备可用度的影响

为剔出预防性维修对结果的干扰,装备系统可用度 A_o 可以用下式表示:

$$A_o = \frac{T_{BF}}{T_{BF} + \overline{M_{CT}} + T_{MLD}} \tag{1}$$

其中,T_{BF} 为平均故障间隔时间;$\overline{M_{CT}}$ 为平均修复时间;T_{MLD} 为平均后勤延误时间.

保障设备的保障会增加 T_{MLD},产生的 ΔT_{MLD} 主要来自 3 个方面:保障设备使用保障时间、保障设备故障导致附加保障活动时间、保障设备故障导致维修等待时间. 保障设备在使用前会不定期的进行使用保障,当使用保障活动发生在装备保障活动前就会产生后勤时间的延误. 保障设备故障时产生附加保障活动也增加了后勤延误时间. 在装备的维修过程中,保障设备发生故障且没有可更换保障设备的情况下,装备维修保障活动需要等待保障设备完成修复或处于占用保障设备释放后才能继续进行,此期间的等待时间也是延误时间的一个重要组成. 保障设备保障产生的后勤延误时间 ΔT_{MLD} 可用式(2)、式(3)表示.

$$\Delta T_{MLD} = \sum_{i=1}^{n} T_{oti} \times q_{oti} + \sum_{i=1}^{n} T_{ati} \times q_{hpi} + \sum_{i=1}^{n} T_{wti} \times q_{hpi} \times q_{wi} - T_{lap} \tag{2}$$

$$T_{ati} = [\alpha \times 0 + \beta \times (0 \sim 1) + \gamma \times (1 \sim K)] \times T_{mi} \tag{3}$$

$\sum_{i=1}^{n} T_{oti} \times q_{oti}$ 表示在保障活动中,所需 n 种保障设备的使用保障时间之和,其中 T_{oti} 表示保障设备 i 的一次使用保障时间,q_{oti} 表示保障设备 i 的使用保障发生频率. $\sum_{i=1}^{n} T_{ati} \times q_{hpi}$ 表示在保障活动中,所需 n 种保障设备的附加维修活动时间之和,其中 T_{ati} 表示保障设备 i 故障的影响时间,q_{hpi} 表示保障设备 i 故障的发生频率. T_{ati} 的计算方式如公式(3),即对各类故障影响的发生频率与附加保障活动数量之积求和,并与保障活动时间 T_{mi} 相乘.

$\sum_{i=1}^{n} T_{wti} \times q_{hpi} \times q_{wi}$ 表示在保障活动中,所需 n 种保障设备的维修等待时间之和,其中 T_{wti} 表示保障设备 i 故障后一次维修等待的时间,q_{wi} 表示保障设备 i 发生维修等待的频率,T_{lap} 为多种保障设备同时处于不可用状态时累计的交叠时间.

由于算法中各种频率的统计和时间的累积很难通过解析的形式得到,多种保障资源的不可用时间在装备的保障活动中会出现交叠的时间则更难以统计. 所以本文采用仿真的方式来模拟过程中由于保障设备故障对系统可用度产生的影响.

3　维修保障仿真流程

3.1　仿真的基本假设

为便于考虑保障设备保障过程的维修保障过程仿真的顺利进行,需要进行如下的假设:

1)装备各可更换故障组件(LRU,Line Replaceable Unit)相互独立,不会发生关联故障,但各 LRU 可能同时发生故障;

2)只考虑装备的修复性维修过程;

3)保障组织的管理和运作中的复杂情况都被忽略,不考虑保障资源的获取时间;

4)认为除保障设备外的其他保障资源都是充足可靠的;

5)装备 LRU 和复杂保障设备寿命都服从指数分布.

3.2　仿真流程

在前述模型的基础上,应用 Monte Carlo 仿真方法,通过离散分布概率抽样技术来模拟维修保障过程中的随机过程. 如图 3 所示. 图中的图形对应序号,具体过程如下:

1)获取仿真输入数据,主要包括:装备各 LRU 的平均故障间隔时间(MTBF,Mean Time Be-

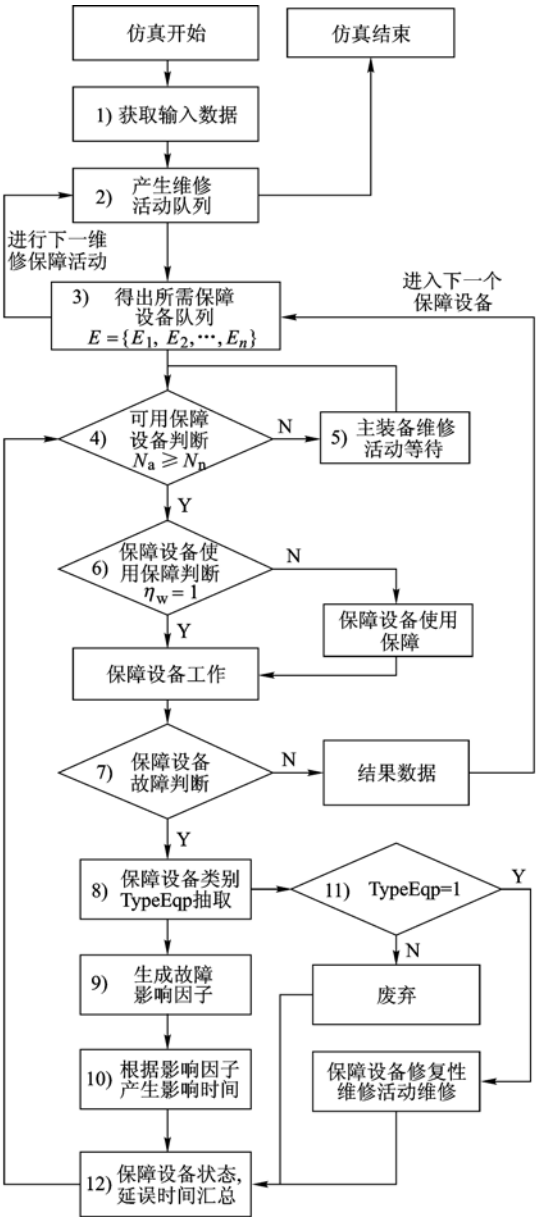

图3 考虑保障设备保障的维修过程流程

tween Failure)、平均维修间隔时间(MTTR, Mean Time To Repair)和维修所需保障设备;保障设备的MTBF,MTTR,影响因子 α,β,γ 和保障设备类型等.

2) 对装备各LRU抽取随机数 η_f,判定LRU是否故障. 记录各维修活动产生时间和维修活动结束时间,判断每天的可用装备数量.

3) 根据具体活动查找维修所需保障设备集合 $E=\{E_1,E_2,E_3,\cdots,E_n\}$.

4) 针对保障设备集合中的保障设备 i 进行数量判断,N_a 为保障设备 i 的可用数量,N_n 为保障设备 i 的需求数量,当 $N_a \geqslant N_n$ 时,表示存在保障设备满足装备维修活动要求,待命状态保障设备数量减少 N_n,占用保障设备数量增加 N_n.

5) 装备维修活动缺乏保障设备而挂起,监控所需保障设备空闲状态数量,待补充后活动继续进行,此等待时间加入维修保障延迟时间.

6) 根据不同保障设备的特性生成使用保障随机数 η_w,判断保障设备是否需要使用保障活动.

7) 对各保障设备 i 利用泊松分布抽取随机数 η_{sf},判断保障设备 i 是否故障.

8) 判断发生故障的保障设备类别.

9) 生成0~1的随机数 η_a,利用保障设备影响程度产生概率判断保障设备 i 故障的影响等级.

10) 根据确定的保障设备影响等级,产生维修活动附加影响时间.

11) 根据保障设备保障方式类别TypeEqp确定保障设备的处理方式.

12) 汇总过程中产生的延误时间和装备维修活动及保障设备的状态变化时间.

4 案例分析

4.1 输入数据

适当简化某飞机设计阶段数据,得到该仿真案例. 24架飞机组成基本作战单元,飞机由10个重要LRU串联组成,基本作战单元的出动强度为24架次/d,连续出动100 d,装备故障数据根据装备LRU的MTBF随机产生,在外场执行更换维修. 共有5种保障设备,用e1~e5表示,通过不同组合完成LRU的维修,保障设备故障由保障设备的MTBF随机产生,保障设备故障后在外场进行更换维修,模型假定保障设备的备件齐备、各种装备和其他资源齐备. LRU与保障设备的MTBF和MTTR如表3所示,保障设备故障影响数据如表4所示.

表3 可靠性与维修性参数

编号	MTBF/h	MTTR/h	维修所需保障设备
LRU1	200	3	e2, e4, e5
LRU2	100	2.5	e2, e3
LRU3	200	4	e2, e4, e5
LRU4	200	2.5	e1, e4, e5
LRU5	150	3.5	e4, e5
LRU6	100	4	e2, e4, e5
LRU7	200	2	e1,e3,e4,e5
LRU8	150	3.5	e2,e4,e5
LRU9	200	2.5	e2,e3,e4,e5
LRU10	150	3	e1,e2,e3,e4,e5
e1	500	2.5	Null
e2	500	3	Null
e3	500	2	Null
e4	500	5	Null
e5	500	3	Null

表 4　保障设备影响参数设定

参数	e1	e2	e3	e4	e5
α	1	1	0	0.1	0
β	0	0	1	0.85	0.9
γ	0	0	0	0.05	0.1
使用保障间隔/h	0	4	48	6	48
使用保障时间/h	0	0.2	0.5	0.3	1
初始配置数量/台	100	6	5	4	4

4.2　仿真输出

仿真输出如图 4 所示. data1 为考虑保障设备保障过程的保障系统可用度变化曲线,date2 为传统保障模型可用度变化曲线. data1 均值为 0.897 8,data2 均值为 0.971 4. 考虑保障设备的保障过程后,可用度有了较为明显的下降,可见保障设备的保障过程带来的影响是不容忽视的.

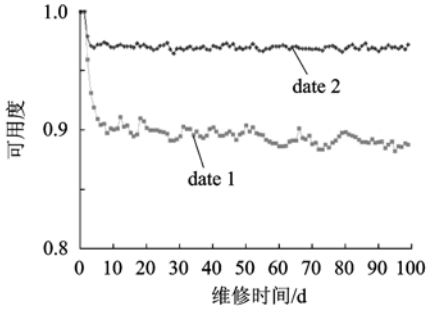

图 4　可用度对比

5　结 束 语

本文分析并建立了保障设备的保障过程模型,并通过仿真程序的分析得到保障设备的保障对装备维修保障过程的影响. 弥补了保障设备保障过程研究的空白,揭示了保障设备的保障过程对装备维修保障的影响. 为研制阶段的保障设备可靠性维修性参数设计提供了一条可行的途径,为保障设备保障工作的开展提供了支持. 但目前保障设备的保障过程数据收集还较少,在保障设备的使用过程中注意对数据的收集将会对改善保障设备的保障过程起到非常重要的作用.

参考文献（References）

[1] 王乃超,康锐,王禹. 基于产品维修策略的保障设备需求量计算模型研究[J]. 系统工程与电子技术,2009,31(5):1266 - 1269
Wang Naichao,Kang Rui,Wang Yu. Research on support equipment number determination model basing on item repair policy [J]. System Engineering and Electronics,2009, 31(5):1266 - 1269(in Chinese)

[2] 郭霖瀚,康锐,文佳. 以保障活动为中心的装备保障资源数量预测[J]. 航空学报, 2009,30(5):919 - 924
Guo Linhan, Kang Rui,Wen Jia,Quantitative forecast of support activity centered equipment support resources[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica,2009,30(5):919 - 924(in Chinese)

[3] 孙 蛟,虞健飞,辛文逵. 基于仿真的军用飞机保障设备利用率计算模型[J]. 系统仿真学报,2009,21(11):3219 - 3221
Sun Jiao,Yu Jianfei,Xin Wenkui. Military aircraft support equipment utilization rate computing model based on simulation[J]. Journal of System Simulation,2009,21(11) :3219 - 3221(in Chinese)

[4] 郭红芬,刘福胜. 利用排队模型优化保障设备数量[J]. 装甲兵工程学院学报,2005,19(1):29 - 31
Guo Hongfen,Liu Fusheng. Use queuing theory model to optimize the quantity of the support equipment[J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering,2005,19(1):29 - 31(in Chinese)

[5] 郭彩芬,王宁生. 基于排队理论优选工作站设备数量[J]. 工业技术经济,2004, 23(3):101 - 102
Guo Caifen,Wang Ningsheng. Optimize equipment number basing on queuing theory[J]. Industrial Technology & Economy, 2004, 23(3):101 - 102(in Chinese)

[6] 郭霖瀚,康锐. 基本作战单元的任务持续性仿真度量模型研究[J]. 系统仿真学报,2009,2(21):325 - 329
Guo Linhan, Kang Rui. Individual operational unit sustainability simulation measure model research[J]. Journal of System Simulation,2009,21(2):325 - 329(in Chinese)

[7] 郭霖瀚,康锐,基本作战单元修复性维修过程建模仿真[J]. 北京航空航天大学学报,2007,33(1):27 - 71
Guo Linhan, Kang Rui. Base operational unit corrective maintenance process modeling and simulation[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2007,33(1):27 - 71 (in Chinese)

[8] Warrington Les,Jones Jeffery A,Davis Neil. Modeling of maintainance,within discrete event simulation [C]//Proceedings of the Annual Reliability and Maintainability Symposium. Seattle: IEEE,2002: 260 - 265

[9] Craig R W. A methodology for addressing support equipment obsolescence[J]. Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2002,5(17):20 - 25

[10] Tracy M C Ⅱ,Pavek D F,Schroeder J P Schroeder. A support equipment improvement opportunity[C]//Aerospace and Electronics Conference, NAECON 1997. Proceedings of the IEEE 1997 National. Dayton,OH,USA:IEEE,1997,1:438 - 445

[11] Nguyen H D,Miller I A. Reliability and efficiency of electrical ground support equipment through automation. modulazition, and standardization [J]. Autotestcon 2007 IEEE, 2007: 311 - 320

[12] Feeney G J,Sherbrooke C C. The (s - 1,s) inventory policy under compound poisson demand[J]. Management Science, 1966,12(5):391 - 411

[13] Zotti J M,Blount A. An approach to reducing maintenance and development costs of complex support equipment[C]//Systems Readiness: Test Technology for the 21st Century' Conference. Atlanta,GA,USA:[s. n.],1995,8: 356 - 36

[14] Brown James M,Chasteen Joseph W. Ground support equipment for the pershing weapon system[J]. Aerospace and Electronic Systems Society,1966,4:729 - 745

(编　辑:娄　嘉)