基本作战单元修复性维修过程建模仿真

郭霖瀚 康 锐

(北京航空航天大学 工程系统工程系，北京 100083)

摘 要：为分析评价基本作战单元修复性维修保障方案，准确计算故障修复时间，根据系统工程建模思想，建立了基本作战单元站点间、站点内修复性维修过程仿真模型，对其修复性维修活动进行了详细描述，提出了累积维修比、维修模式比和拆卸率因子参数，为基本作战单元修复性维修过程的定量分析提供了度量方法，并根据 Monte Carlo 仿真原理给出仿真算法，为型号工作人员进行保障性设计分析提供了理论方法和技术手段，最后以某型飞机组成的基本作战单元为例，对其修复性维修保障方案进行仿真试验验证，分析了修复性维修过程的改进对保障资源和维修时间的影响.

关 键 词：故障；维修；建模；仿真

中图分类号：V 215.7

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2007)01-0027-05

Base operational unit corrective maintenance process modeling and simulation

Guo Linhan Kang Rui

(Dept. of System Engineering of Engineering Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: To analyze base operational unit(BOU) corrective maintenance stratagem and accurately calculate fault recovery time, BOU corrective maintenance process simulation models among depots was set up, the models in depot was also set up according to system engineering modeling ideology, BOU corrective maintenance activities was described. Accumulate maintenance rate(AMR), maintenance mode rate(MMR) and remove rate(RR) parameters were presented. Measurement methods based on the parameters were given via to which BOU corrective maintenance process was quantitatively analyzed. The simulation algorithm was made out according to Monte Carlo simulation method. Theory and technology means were offered to equipment designer in the supportability design and analysis working areas. The corrective maintenance concept(CMC) was validated in an airplane individual unit example making use of simulation tests. The effects to support resource and maintenance time was analyzed with the bettered CMC.

Key words: failure; maintenance; models; simulation

基本作战单元是指按照部队编制由相同主战装备及其所属保障系统构成可以独立执行作战或训练任务的最小军事单位. 基本作战单元中装备故障修复时间会影响其任务持续能力，而装备故障的修复主要依赖修复性维修过程，且基本作战单元中装备从任务开始到结束可能会出现多个故障，由于每个故障组件具有多种故障模式，而不同的故障模式对应着不同的维修过程，并且修复不同故障模式组件的复杂程度不同，并不是每一个站点都有能力修复其所有的故障模式. 故障在保障组织中被修复，保障组织一般采用三级维修，各个维修级别有其对应的维修站点. 维修级别之间是垂直保障关系，除了基地级维修站点外，中继级和基层级站点都有更高维修能力的站点作为其上

收稿日期：2006-02-28

作者简介：郭霖瀚(1979—)，男，河南许昌人，博士生，chasesunny@263.net.

级站点,故障组件和被修复的完好组件在各维修级别之间按照约定的组织关系在维修站点之间流动,不同的故障模式可能会在不同的维修站点进行修复.在某保障站点内的修复工作通常也要通过故障定位、拆卸、获取组件、安装、测试等若干个维修活动按照一定的时间顺序组成,并且在特定的维修活动中还需要相应的维修资源,包括维修设备、测试设备、维修人力、备件、维修设施等[1].正是由于修复性维修保障过程中涉及到上述诸多不确定的影响因素,导致了基本作战单元中装备修复性维修过程的离散性和随机性,因此需要建立基本作战单元的修复性维修保障过程模型来抽象描述装备的故障修复过程[2],采用 Monte Carlo 仿真方法求解模型[3-4],进而分析和评估影响基本作战单元装备任务持续能力的不可用时间.

1 修复性维修过程模型

1.1 站点间修复性维修过程模型

装备的典型特征就是由可更换组件组成,当装备发生故障后,总是首先在外场拆卸可更换故障组件(LRU,Line Replaceable Unit),更换下来的组件会继续在站点间流动,直至被某一级别上的维修站点修复,如图1所示.完好组件可以通过修复、备件、串件3种方式获得.如果通过修复方式获得,需要根据组件故障模式的复杂程度确定其对应级别的维修站点.由于组件在某个时刻出现某种故障模式是随机的,所以某一组件每次故障时能够对其进行修复的站点级别也是随机的.同一类型的组件在某个维修级别往往只对应一个维修站点,因此确定修复故障组件的维修级别就成为描述站点间修复维修过程的关键.

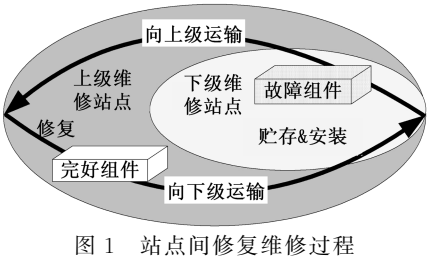

图1 站点间修复维修过程

组件的故障模式在设计过程中通过 FMEA(Failure Mode and Effect Analysis)确定,然后根据不同维修级别站点的维修技术条件,在部队编制体制的约束下通过 LORA(Level of Repair Analysis)确定组件每种故障模式的维修级别.这样就可以建立组件故障模式和维修级别之间的对应关系,如果在第 i 级维修站点内能够维修(k)组件的故障模式个数为 $F_{\mathrm{MN}}^{(k)}$,该值不包括下级维修站点可以修理的故障模式,那么在第 i 级别的站点能够维修(k)组件的故障模式占该组件所有故障模式的比值就可以通过式(1)确定:

$$F_{\mathrm{MR}i}^{(k)}=F_{\mathrm{MN}i}^{(k)}\Big/\sum_{j=1}^{n}F_{\mathrm{MN}j}^{(k)} \tag{1}$$

式中,$F_{\mathrm{MR}i}^{(k)}$ 为(k)组件在第 i 级维修站点的维修比;n 为保障站点的级数,一般情况下 $n=3$.

模型中认为上级维修站点的维修能力高于下级维修站点的维修能力,如果(k)组件故障在第 i 级进行维修的概率用 $P^{(k)}(d=i)$ 表示的话,显然

$$\sum_{i=1}^{n}F_{\mathrm{MR}i}^{(k)}=1 \tag{2}$$

$$P^{(k)}(d=i)=F_{\mathrm{MR}i}^{(k)} \tag{3}$$

式中随机变量 d 表示可能的维修级别数.则由式(1)~式(3)可得 d 的分布函数为

$$F^{(k)}(d)=\sum_{i=1}^{d}F_{\mathrm{MR}i}^{(k)}\qquad d=1,2,3 \tag{4}$$

式中 $F^{(k)}(d)$ 也可以叫做(k)组件在第 i 级站点的累积维修比.组件的累积维修比可以用来表征保障组织对于某型组件的维修能力.在最高级维修站点,(k)组件的累积维修比等于1,这样就避免了模型中出现无法维修的故障组件.故障组件必须按照修复维修策略的既定路线进行运输,运输通常导致修复过程延迟.

1.2 站点内修复性维修过程模型

装备的故障并非都是通过更换故障组件来排除,装备的不可更换部分也可能会发生故障.因而对于装备故障可以通过更换一个或多个组件进行修复,亦可通过对装备的不可更换部分直接维修进行修复.组件与装备在站点内的维修过程类似,同样也是通过直接维修或通过更换下一级故障组件来修复.如图2所示,"或1"节点表示组件故障后或通过直接维修过程,或通过更换维修过程或通过额外拆卸维修过程完成修复工作[5].各框代表维修活动,每个维修活动的执行都需要一定时间,在执行维修活动的过程中需要使用相应的维修资源.若在维修活动开始时,缺乏可用的维修资源,特别是当同时对多个装备进行维修时,可能存

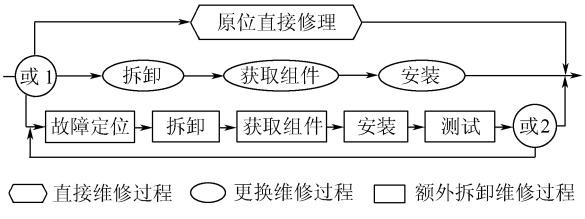

图2 站点内修复维修过程

在多个维修活动同时竞争有限的维修资源,缺乏维修资源的维修活动需要等待,模型认为维修时间最短的维修活动具有获取资源的最高优先级.

1) 直接维修过程模型. 直接维修过程只包括原位直接维修活动,也称其为直接维修模式,即对故障组件在原位执行修理工作. 由于组件的故障并非都是由组成该组件的下一级组件的故障导致的,如果该组件由 n 个下一级组件组成,根据故障率的定义,此时认为

$$\lambda_S > \sum_{j=1}^{n}\lambda_j \tag{5}$$

式中,λ_S 为组件故障率;λ_j 为组成该组件下一级第 j 个组件的故障率. 令随机变量:

$$X=\begin{cases}0 & \text{下级可更换组件导致组件故障}\\ 1 & \text{非下级可更换组件导致组件故障}\end{cases}$$

则其概率为

$$\left.\begin{aligned}P^{(k)}(X=0)&=\sum_{j=1}^{n}\lambda_j/\lambda_S\\ P^{(k)}(X=1)&=\left(\lambda_S-\sum_{j=1}^{n}\lambda_j\right)\Big/\lambda_S\end{aligned}\right\} \tag{6}$$

其分布函数为

$$F^{(k)}(x)=\begin{cases}\sum_{j=1}^{n}\lambda_j/\lambda_S & 0\leqslant x<1\\ 1 & x\geqslant 1\end{cases} \tag{7}$$

式中,$P^{(k)}(X=0)$是下级可更换组件导致组件(k)故障的概率;$P^{(k)}(X=1)$是非下级可更换组件导致组件(k)故障的概率;$F^{(k)}(x)$是随机变量 X 的分布函数,将 $F^{(k)}(0)$称作组件(k)的维修模式比. 通过维修模式比来表征组件处于直接或更换维修模式的概率.

2) 更换维修过程模型. 更换维修过程包括拆卸和更换 2 个必需的维修活动,也将其称为更换维修模式,这 2 个维修活动在时间上是顺序关系. 如图 2 所示,典型的更换维修活动分为拆卸、获取组件和安装. 拆卸活动就是拆除失效产品. 由于装备组成的层次关系,在故障组件的维修活动结束后,仍然可能需要其它类型的维修活动来处理该组件下一层次组件的故障,如果被拆下故障组件可修复,它将被送入相应级别的维修站点. 安装活动是指安装完好组件的操作. 在安装活动开始之前必须有可用的备件,如果不存在可用的备件,整个维修活动将被迫暂停,直至有备件到来,组件处于更换维修模式的概率及其分布见式(7). 不同类型的故障组件以及不同的故障模式对应的维修活动是有差别的. 本模型中,更换时间主要分为组件的拆卸和安装时间以及获取资源的时间,也可以将典型的维修活动继续展开为一系列串行的维修活动,通过定义其持续的时间和所需要资源来达到更为细致的建模粒度,输出更为准确的时间数据.

3) 额外拆卸维修过程模型. 在实际的维修过程中,要更换故障组件时,由于装备的故障不能准确地定位到装备中的组件,或是由于多重故障,或是无法直接可达故障组件,这时故障组件的下一级组件被拆卸的次数是要大于该组件故障的次数,这些多出来的拆卸次数被定义为额外拆卸,额外拆卸维修过程也称为额外拆卸维修模式. 如果维修活动中包括额外拆卸,那么对于维修过程的建模就要相对复杂一些,在组件的更换维修模式中,可能会有一个或多个额外组件被拆卸. 被拆卸下来的组件可能是故障组件也可能是无故障组件,如果额外拆卸是由于不准确的故障定位引起的,且不存在多重故障,那么被拆卸下来的组件就是无故障组件,如果是由于多重故障导致的额外拆卸,但是能够准确地故障定位,那么被拆卸下来的组件是故障组件,所以额外拆卸活动也可能嵌套. 额外拆卸的维修活动包含如图 2 所示的几个典型维修活动,每一个维修活动也都有延时,"或 2"节点表示在测试活动完毕后,如果组件的故障仍然没有排除,就需要重新执行故障定位活动.

如果组件单位时间被拆卸次数为 R_{Ti},则

$$R_{FFi}=R_{Ti}/\lambda \tag{8}$$

式中,R_{FFi}是组件的拆卸率因子;λ 是组件的故障率;$R_{FFi}-1$ 表征组件单位时间内被额外拆卸的次数,假设额外拆卸是均匀分布在等待更换组件的所有下一级组件上. 将故障组件中下一级组件被额外拆卸次数的平均值记为 $\overline{E}_{RT}$,$\overline{E}_{RT}$是其每个下级组件被额外拆卸的次数按照其故障率的加权平均值,即 $\overline{E}_{RT}$可以通过 R_{FFi}由式(9)计算得到:

$$\overline{E}_{RT}=\sum_{j=1}^{m}\lambda_j\cdot(R_{FFj}-1)\Big/\sum_{i=1}^{n}\lambda_i \tag{9}$$

式中,m 是故障组件中下一级组件的个数;λ_i 是其下级组件中第 i 个组件的故障率;R_{FFj}是故障组件下级第 j 个组件的拆卸率因子. 实际每次额外拆卸数量 E_{RTS}应服从以 $\overline{E}_{RT}$为均值的离散分布,当 $E_{RTS}>1$ 时就需要在图 2 中"或 2"节点处多次返回,重新执行故障定位活动,查找故障组件,额外拆卸可能导致同一个组件被多次拆卸.

如果组件由于非共因故障单位时间内被拆下的次数为 N_{FTi},则

$$N_{FFi}=N_{FTi}/\lambda \tag{10}$$

式中 N_{FFi}是无故障发现率因子[6],因此对于被额

外拆卸的组件故障的概率 p_{fi} 计算方法是

$$p_{fi}=(N_{\mathrm{FF}i}-1)/(R_{\mathrm{FF}i}-1) \tag{11}$$

式中 $R_{\mathrm{FF}i}\geqslant N_{\mathrm{FF}i}$. 额外拆卸维修过程也包括等待资源的过程,并且额外拆卸导致的无故障发现组件与故障组件的送修方式基本相同. 经检测无故障后被送回原站点,但存在一定的延时(时间通常比较短). 因为在拆卸的时候不能确认组件是否故障,只有经过检测后才能确定,通常情况下无故障发现组件的周转时间比故障组件周转时间短.

2 修复维修保障过程仿真算法

根据前述模型,应用 Monte Carlo 仿真方法,通过离散分布概率抽样技术来模拟基本作战单元装备修复维修活动中的随机过程[6-7],如图 3 所示. 图中各方框左上角标识有与下文对应的序号,具体实现方法如下:

1) 获取装备可靠性、维修性、保障组织、保障资源和修复维修策略输入数据;

2) 抽取 0～1 之间随机数 η_{AMF},确定故障组件的维修站点,如果 $F^{(k)}(d-1)<\eta_{\mathrm{AMF}}\leqslant F^{(k)}(d)$,则该故障模式可以在该级别站点修理,如果随机数 $F^{(k)}(d+1)\geqslant\eta_{\mathrm{AMF}}>F^{(k)}(d)$,则故障产品将被送入上一级维修站点进行维修;

3) 抽取 0～1 之间随机数 η_{MMF},与组件维修模式比 $F^{(k)}(0)$ 比较,确定故障组件的维修模式,判断是否进行更换维修工作或进入直接维修工作,如果 $\eta_{\mathrm{MMF}}\leqslant F^{(k)}(0)$,此时认为系统的故障是由可更换组件的故障引起的;

4) 如果是直接维修模式,执行原位直接维修活动,在直接维修活动完毕后,故障组件被修复;

5) 如果是更换维修模式,确定拆卸次数均值 $\overline{E}_{\mathrm{RT}}$,根据额外拆卸次数的均值 $\overline{E}_{\mathrm{RT}}$ 判断是否有额外更换维修活动;

6) 如果执行更换维修活动(无额外拆卸情况发生),在更换维修活动完毕后,故障组件被修复;

7) 如果是额外拆卸维修活动,则以 $\overline{E}_{\mathrm{RT}}$ 为某离散概率分布均值,如可以用泊松分布来模拟 $\overline{E}_{\mathrm{RT}}$ 的实际分布,抽取拆卸次数;

8) 确定无故障发现概率 p_{fi},用于确定被更换下来的组件是否为无故障发现组件;

9) 执行有额外拆卸更换维修活动,对额外拆卸下来的故障组件和无故障发现组件分别执行相应的维修活动;

10) 根据 E_{RTS} 当前值判断额外拆卸是否完成,若未完成,继续执行有额外拆卸更换维修活动;

11) 在当前故障组件被修复后,输出结果数据,维修时间根据输入的维修活动时间累加,同时相应维修活动的维修资源计数器统计资源使用数量及闲置数量;

12) 根据组件的组成及故障数据判断该组件的下一层次组件是否需要维修;

13) 如果维修较低一级故障组件,重复执行步骤 1)～12),如果没有较低一级组件需要维修,则此修复维修过程执行完毕.

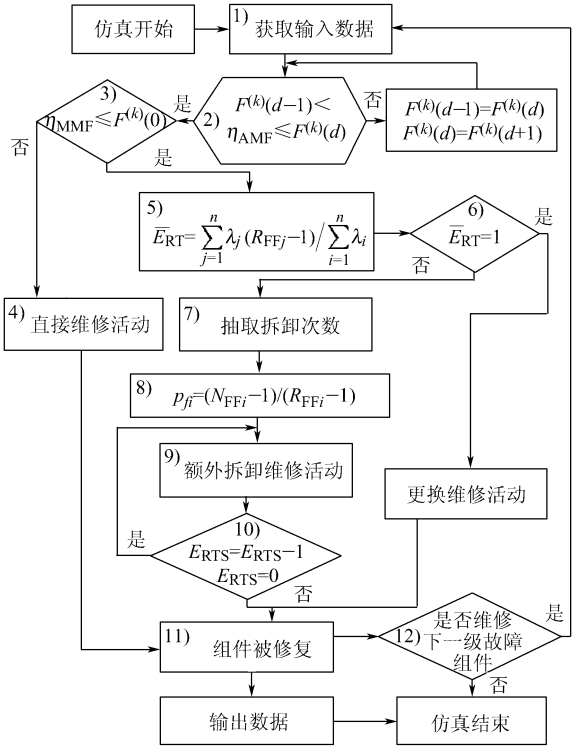

图 3 修复维修保障过程仿真算法

通过仿真运行可以得到 3 类基本的输出参数,包括由于对故障的修复或在修复过程中等待维修保障资源造成的装备的不可用时间参数、维修站点的维修工时参数、保障资源的利用率和满足率参数,利用上述参数最终分析基本作战单元装备的持续能力以及保障系统的保障能力.

3 仿真试验案例

在某型飞机设计阶段,权衡分析维修过程对于多架飞机构成的基本作战单元修复维修时间及保障资源的影响. 该案例经过合理的简化,由 10 架飞机组成一个基本作战单元,整机的故障率为 279 156.8/(10^6 h),每架飞机由 3 个 LRU 组成,如表 1 所示. 基本作战单元的出动强度为 0.5 次/(架·d),连续出动 30 d,装备的故障数据在基本作战单元任务执行过程中根据故障率及装备的组成数据随机产生,对于故障 LRU 的更换全部在

机场执行,LRU 的维修分别在对应的维修站点进行,站点间的运输时间设定为 3 h,保障资源仅考虑维修资源,如表 2 所示. 首先是在没有测试性设计,即不能准确进行故障定位的情况下,通过仿真程序算出了修复故障装备的平均时间及保障资源的满足率和利用率,然后修改了维修策略输入,计算了能够准确进行故障定位后的仿真输出数据,通过比较可以辅助设计人员进行保障性分析.

表 1　装备组成数据

组件名称	故障率/$(10^6 h)^{-1}$	单机拥有数量/个	类型
发动机	56 578.4	2	LRU
雷达	35 333.6	2	LRU
飞控仪	31 777.6	3	LRU

表 2　维修资源配置数据

资源名称	资源配置站点名称	维修活动名称	配置数量/个
维修工人	机场	LRU 更换	6
雷达测试仪	师级维修站	LRU 维修	2
飞控测试仪	军区大修厂	LRU 维修	3

3.1　输入数据

1) 保障组织数据.

定义三级维修站点,分别为机场(外场级)、师级维修站(中继级)、军区大修厂(基地级).

2) 装备组成及维修资源输入数据.

3) 维修性参数、修复性维修策略、维修活动输入数据.

当修理飞机时,由于不能准确地把故障定位到雷达和飞控仪. 据经验估计,当雷达故障时,不能准确地定位到雷达,而必须拆卸雷达和飞控仪的情况占 80%;同样的,飞控仪故障时,不能准确地定位到飞控仪,必须拆雷达和飞控仪的情况占 90%,发动机故障时通常能准确定位. 故雷达的移除率因子为 1.81,飞控仪的移除率因子为 1.89,发动机的移除率为 1.00,如表 3 所示.

表 3　维修性参数及维修活动定义输入表

组件名称	产品维修所在站点名称	产品更换维修所需时间/h	产品直接维修所需时间/h	移除率因子	无故障发现率因子	维修活动名称
发动机	师级维修站		22.0			LRU 维修
雷达	师级维修站		12.0			LRU 维修
飞控仪	军区大修厂		30.0			LRU 维修
发动机	机场	5.0		1.00	1.00	LRU 更换
雷达	机场	3		1.81	1.00	LRU 更换
飞控仪	机场	2.5		1.89	1.00	LRU 更换

3.2　输　出

如图 4 所示,基本作战单元在持续 30 d 的时间内累积维修时间为 1 288 h. 维修资源的满足率是 0.794,利用率是 0.987.

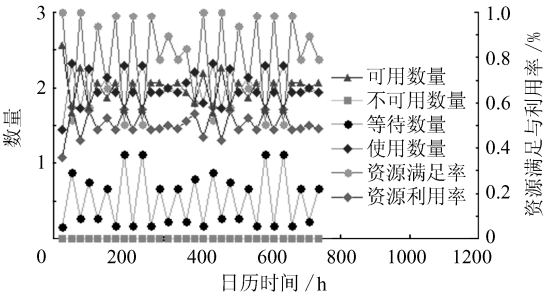

图 4　保障资源输出图

3.3　敏感性分析

将表 3 中移除率因子调整为 1.00,相当于装备中引入测试性设计后,能够进行准确的故障定位,经过仿真试验后输出的数据如表 4、图 5 所示,维修时间减少 38.04%,资源的满足率增加 11.50%,资源的利用率减少 20.06%. 说明该仿真模型可以在型号的研制过程中有效地辅助设计人员开展维修保障系统的设计分析工作.

表 4　敏感性分析数据比较

资源名称	资源利用率	维修时间/h	资源满足率
原值	0.628	1 288	0.794
改变后的值	0.502	798	0.909

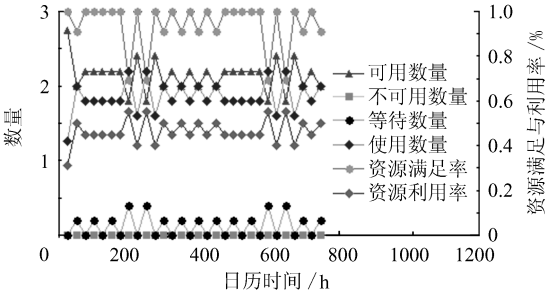

图 5　引入测试性设计后的保障资源输出图

4　结 束 语

本文根据系统工程的建模仿真思想提出了基本作战单元修复维修过程仿真模型,为基本作战单元修复性维修保障方案的分析、评价提供了理论方法和技术手段,并以某型飞机为例,通过仿真试验,分析了维修过程的改进对装备保障资源及不可用时间的影响,进而可以辅助型号工作人员进行设计分析. 本模型不仅可以用于装备的设计阶段对修复维修保障方案进行建模和分析,而且可以进一步拓展到装备全寿命周期的各个阶段,为装备 RMS(Reliability Maintainability Supportability)论证、方案设计分析、详细设计分析、试验和使用决策提供理论与应用支持.

(下转第 71 页)