

## 研制阶段装备使用可用度综合评价方法

卢雷, 杨江平

(空军预警学院,湖北武汉,430019)

**摘要** 针对研制阶段装备使用可用度难以评价的问题,提出了一种将试验设计、仿真建模、回归树分析相结合的综合评价方法。首先,基于离散事件仿真软件 Arena 建立两级维修保障模式下单部装备使用可用度仿真模型;然后,采用拉丁超立方抽样完成仿真输入想定的设计;最后,在运行仿真模型获得使用可用度输出数据的基础上,应用回归树模型确定了影响使用可用度的关键因素,并进行了实例分析。结果表明:该综合方法在保证仿真精度的同时减少了抽样次数,能对装备使用可用度进行仿真预计和敏感性分析,可用于研制阶段装备保障性试验与评价。

**关键词** 使用可用度评价;Arena 仿真;拉丁超立方体抽样;回归树

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2013.05.004

**中图分类号** TP931 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2013)05-0013-04

## Integrative Evaluating Method of Equipment Operational Availability in Development Phase

LU Lei ,YANG Jiang-ping

(Air Force Early Warning Academy , Wuhan 430019 , China)

**Abstract:** In order to solve the problem that it is difficult to evaluate the equipment operational availability in development phase , an integrative evaluating method that combines experiment design , simulation modeling and regression tree is proposed . The simulation model of single equipment operational availability under two-echelon maintenance support structure is developed by using arena software , the design of input scenario is accomplished by adopting latin hypercube sampling (LHS) , the output data of operational availability is obtained through running the established simulation model , and factors that have obvious influence on operational availability are determined by the regression tree . Finally the feasibility of the proposed method is shown by numerical examples .

**Key words :** operational availability evaluation ; Arena simulation ; Latin hypercube sampling ; regression tree

在装备的研制阶段,由于还没有建立起有效的保障系统,装备的保障性设计特性(可靠性、维修性等)和保障资源要素之间的关系很难用精确的数学

模型来描述。此时常借助仿真方法对装备使用可用度进行评价。文献[1~2]采用蒙特卡洛方法产生故障和维修时间,分别建立了舰船、综合光电系统使用

收稿日期:2012-11-07

基金项目:国家部委基金资助项目

作者简介:卢雷(1985—),男,湖北武汉人,博士生,主要从事装备保障性试验与评价研究。

E-mail:lulei61588772@163.com

可用度仿真模型。文献[3]利用蒙特卡洛方法建立飞机使用可用度仿真评价模型,按固定步长变化进行了平均故障间飞行小时、平均修复时间等输入参数的灵敏度分析。文献[4~5]利用可视化仿真软件 Arena 对飞机、装甲关键部件的维修保障过程进行建模,并按固定步长改变部件故障率、库存水平、维修周转时间等输入变量的取值,进而确定对使用可用度影响最大的因素。这些研究选取蒙特卡洛随机抽样获取仿真输入样本时因为抽样量较大,抽样效率低,无法满足蒙特卡洛抽样高精度结果对抽样规模的要求;用步长法确定影响使用可用度因素时需观察每一个输入变量步进变化幅度,从而确定敏感性因素,计算量也较大。针对以上问题,本文提出了一种使用可用度综合评价方法,在对装备维修保障过程仿真建模基础上,选用拉丁超立方抽样进行试验设计,进而减低采样规模,并应用回归树快速确定影响使用可用度的关键因素,最终实现装备使用可用度的有效评价。

### 1 装备使用可用度仿真建模

根据装备两级维修保障过程,选用离散事件仿真软件 Arena<sup>[6]</sup>,使用可用度顶层仿真模型见图 1。

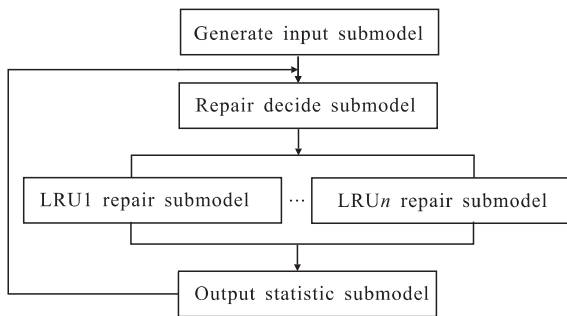


图 1 使用可用度仿真模型

Fig.1 Simulation model of operational availability

仿真输入产生子模型(Generate input submodel)主要实现从 Excel 表中读取单个 Arena 仿真的输入参数值;维修判断子模型(Repair decide submodel)主要对需维修更换的组件进行判断,同时更新装备的工作总时间( $U_{ptime}$ )和  $n$  个关键性组件下一次的故障时间;组件维修子模型(LRU  $i$  repair submodel)主要实现故障组件的更换、故障组

件基地级修复和组件库存数量的调整等功能。输出统计子模型(Output statistic submodel)首先对装备的停机时间(Downtime)进行更新,若仿真时间未达到预先设置的单次仿真总时间,则再次进入维修判断子模型,仿真继续进行;若达到单次仿真总时间,则统计输出单次仿真的装备使用可用度( $A_o$ ),并开始下一次仿真,直至将 Excel 表中预先设定的所有想定都运行完毕,仿真结束。

### 2 使用可用度仿真实想定表

#### 2.1 拉丁超立方抽样

拉丁超立方抽样(Latin Hypercube Sampling, LHS)是一种多维分层抽样方法<sup>[7]</sup>。与直接蒙特卡洛随机抽样相比,在相同的采样规模下,覆盖的随机变量采样空间大,采样稳健性好<sup>[8-9]</sup>。本文选取基于极大极小距离法准则的最优拉丁超立方抽样法(Optimal Latin Hypercube Sampling, OLHS)来实现仿真输入想定表的试验设计。

#### 2.2 仿真实想定表

本文选取某型装备中信号处理板、数据处理板、直流电源模块、收发组件、显示控制板、5 个关键性组件进行仿真,分别对应 LRU1~LRU5。5 个关键性组件的平均故障间隔时间(Mean Time between Failure, MTBF)、库存数量 stock、基地级维修周转时间 Turnaround time、平均修复时间(Mean Time to Repair, MTTR)的取值范围见表 1。

采用基于极大极小距离法准则的 OLHS 对表 1 中输入参数进行抽样设计,抽样次数为 100 次,得到的仿真实想定表见表 2。限于篇幅,表 2 中只列举了前 10 个仿真输入想定。

表 1 仿真输入参数的取值范围

Tab.1 Ranges of input parameters

| 参数               | 取值范围    | 参数           | 取值范围      |
|------------------|---------|--------------|-----------|
| LRU1 MTBF/天      | 80~140  | LRU1 Stock/个 | 1~2       |
| LRU2 MTBF/天      | 105~165 | LRU2 Stock/个 | 1~2       |
| LRU3 MTBF/天      | 70~130  | LRU3 Stock/个 | 1~2       |
| LRU4 MTBF/天      | 65~125  | LRU4 Stock/个 | 1~2       |
| LRU5 MTBF/天      | 110~170 | LRU5 Stock/个 | 1~2       |
| Turnaroundtime/天 | 90~120  | MTTR/天       | 1/48~4/48 |

表2 仿真试验想定表  
Tab.2 Simulation design for first 10 scenarios

| 想定 | LRU1<br>MTBF | LRU2<br>MTBF | LRU3<br>MTBF | LRU4<br>MTBF | LRU5<br>MTBF | LRU1<br>Stock | LRU2<br>Stock | LRU3<br>Stock | LRU4<br>Stock | LRU5<br>Stock | Turnaround<br>time | MTR   |
|----|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------------|-------|
| 1  | 83.636       | 119.545      | 108.788      | 125.000      | 140.909      | 2.000         | 2.000         | 2.000         | 1.000         | 1.000         | 109.394            | 0.062 |
| 2  | 114.545      | 117.121      | 105.152      | 118.939      | 131.212      | 2.000         | 1.000         | 1.000         | 1.000         | 2.000         | 90.000             | 0.083 |
| 3  | 139.394      | 155.909      | 114.242      | 83.182       | 160.909      | 1.000         | 1.000         | 2.000         | 2.000         | 2.000         | 99.091             | 0.021 |
| 4  | 120.000      | 134.091      | 116.061      | 123.182      | 113.636      | 1.000         | 2.000         | 2.000         | 1.000         | 1.000         | 116.061            | 0.062 |
| 5  | 97.576       | 106.212      | 113.636      | 86.212       | 157.273      | 1.000         | 1.000         | 2.000         | 2.000         | 2.000         | 100.909            | 0.083 |
| 6  | 104.242      | 141.364      | 93.030       | 98.939       | 122.727      | 2.000         | 1.000         | 2.000         | 2.000         | 1.000         | 93.030             | 0.042 |
| 7  | 121.818      | 133.485      | 79.697       | 77.727       | 124.545      | 2.000         | 2.000         | 2.000         | 2.000         | 2.000         | 103.636            | 0.042 |
| 8  | 117.576      | 146.212      | 71.212       | 85.000       | 150.000      | 1.000         | 2.000         | 2.000         | 1.000         | 1.000         | 95.152             | 0.042 |
| 9  | 112.121      | 121.364      | 114.848      | 122.576      | 145.758      | 1.000         | 1.000         | 2.000         | 1.000         | 1.000         | 93.333             | 0.021 |
| 10 | 89.697       | 154.697      | 90.606       | 101.364      | 133.636      | 1.000         | 2.000         | 1.000         | 1.000         | 2.000         | 116.364            | 0.042 |

### 3 仿真试验结果分析

#### 3.1 使用可用度仿真结果

基于已建立的使用可用度仿真模型,将由OLHS得到的仿真试验想定表作为输入,依次进行仿真,得到使用可用度的输出结果见图2。

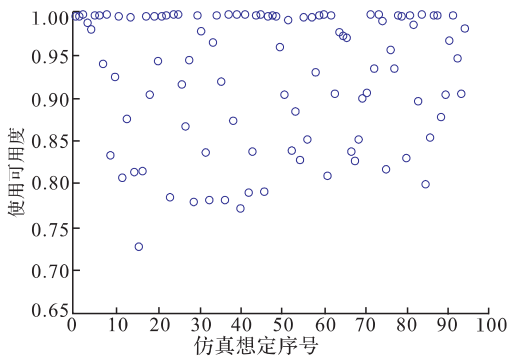


图2 使用可用度仿真结果

Fig.2 Simulation results of operational availability

#### 3.2 敏感性分析

敏感性分析的目的是找到对装备使用可用度影响最大的因素。回归树模型是一种非参数统计方法,由Breiman等人于1984年提出<sup>[10]</sup>。在回归树中,预报变量的重要性表现为2个方面:一是该预报变量出现在树干的起始部位,或离起始部位很接近;二是表现为同一预报变量多次在模型中出现。利用SPSS13.0软件中分类回归树算法,对已产生的100个输入输出数据对进行分析,产生的回归树见图3。由图可见,对使用可用度影响最大的因素依次为LRU4MTBF, Turnaround time, LRU2MTBF。为提高装备的使用可用度,可增大收发组件平均故障间隔时间或缩短基地级维修周转时间。

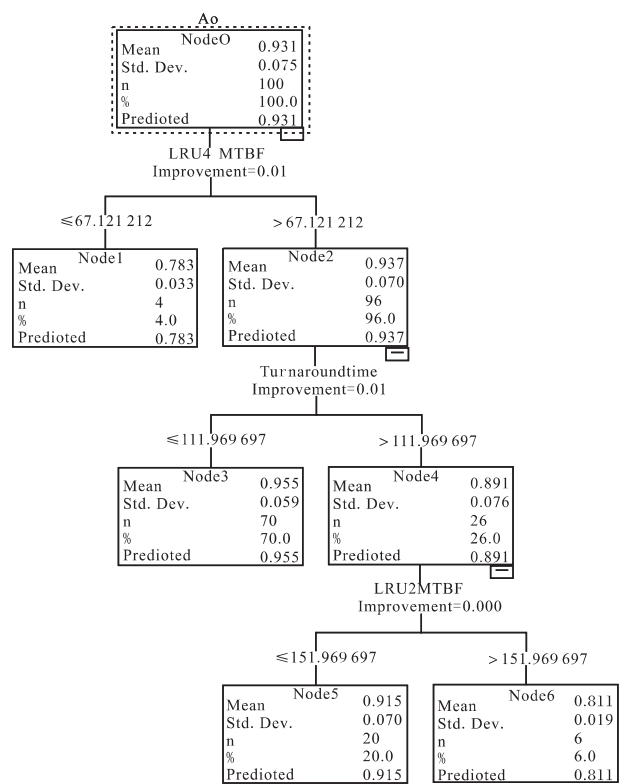


图3 回归树分析结果

Fig.3 Results of regress tree

### 4 结语

本文提出一种拉丁超立方抽样进行试验设计、Arena软件仿真建模和回归树仿真结果分析的综合方法,并将其应用于研制阶段装备使用可用度评价。仿真表明,通过对装备两级维修保障过程的模拟,可以实现对装备使用可用度的预计和评估。与简单蒙特卡洛随机抽样相比,利用拉丁超立方抽样设计仿真想定表,可在保证仿真精度的同时减少抽样次数。同时,应用回归树对仿真数据进行分析可快速有效地确定对使用可用度影响显著的因素。

## 参考文献(References):

- [1] 程文鑫. 基于蒙特卡洛法的舰船装备战备完好性仿真[J]. 兵工学报, 2006, 27(6): 1090-1094.  
CHENG Wenxin. Readiness simulation of ship equipment based on monte carlo method[J]. Acta armamentarii, 2006, 27(6): 1090-1094. (in Chinese)
- [2] 周渝斌, 赵跃进. 综合光电对抗系统的使用可用性评估[J]. 北京理工大学学报, 2002, 22(5): 637-642.  
ZHOU Yubin, ZHAO Yuejin. Estimating operational availability of large synthesized electro-optical confrontation systems[J]. Journal of Beijing institute of technology, 2002, 22(5): 637-642. (in Chinese)
- [3] 焦健, 王自力. 军用飞机使用可用度仿真论证[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(1): 112-116.  
JIAO Jian, WANG Zili. Operational availability demonstration of military airplane based on simulation[J]. Journal of Beijing university of aeronautics and astronautics, 2006, 32(1): 112-116. (in Chinese)
- [4] Rodrigues Marcelo B. An analysis of operational availability of brazilian navy and argentine air force A-4 fleets using simulation modeling[R]. Monterey: Naval postgraduate school, 1999.
- [5] Andreas Balafas. Impact of logistics on readiness and life cycle cost: a life cycle management approach[R]. Monterey: Naval postgraduate school, 2010.
- [6] David Kleton W, Randall P. Simulation with arena[M]. Beijing: McGraw-Hill Education(Asia) Companies, 2004.
- [7] McKay M D, Beckman R J, Conover W J. A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code[J]. Technometrics, 1979, 21(2): 239-245.
- [8] IMAN R L. Uncertainty and sensitivity analysis for computer modeling applications[C]//Proceedings of the winter annual meeting of ASME. Anaheim, California; the American society of mechanical engineers, 1992: 153-168.
- [9] IMAN R L, Conover W J. Small sample sensitivity analysis techniques for computer models with an application to risk assessment[J]. Communications in statistics part A: theory and methods, 1980, 49(17): 1749-1842.
- [10] Breiman L, Friedman L, Olshen R. Classification and regression trees[M]. New York: Chapman & hall, 1984.

## 本刊相关链接文献:

- [1] 肖明清, 程进军. 武器装备研制过程中设立总测试师的必要性[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2003, 4(5): 13-15.
- [2] 苏畅, 张恒喜. 航空装备保障系统效能评估[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2006, 7(1): 13-15.
- [3] 边亚琴, 严盛文, 黄建新. 装备大修定价的模糊综合评判模型[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2006, 7(5): 71-73.
- [4] 刘少伟, 金荣, 张琳. 用粒子群算法优化装备初始备件量[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2008, 9(1): 46-49.
- [5] 郑春辉, 李体方, 高虹霓, 等. 基于 Vague 集的装备研制费用年度分配模型[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2008, 9(4): 83-86.
- [6] 崔毅勇, 崔晨, 苏建勇. 装备售后服务质量模糊层次评估模型[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2009, 10(6): 19-22.
- [7] 胡剑波, 葛小凯, 王瑛, 张博锋. 航空装备综合状态维修框架研究[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2011, 12(6): 1-7.
- [8] 关娇, 刘少伟, 刘剑, 张茜. 基于 ACO 的横向供应策略两级备件库存研究[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2013, 14(1): 90-94.

(编辑: 徐敏)