DOI：10.13700/j.bh.1001-5965.2006.01.026
2006年 1月 北京航空航天大学学报 January 2006
第32卷 第1期 Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics Vol.32 No.1

军用飞机使用可用度仿真论证

焦 健 王自力

（北京航空航天大学 工程系统工程系，北京 100083）

摘 要：使用可用度是军用飞机重要的可靠性维修性保障性RMS(Reliability，Maintainability and Supportability)顶层参数.为了确定合理有效的使用可用度，根据论证阶段的实际情况，综合考虑军用飞机任务需求、初始使用和保障方案以及相似装备的RMS指标等信息，利用Monte-Carlo方法和排队论构建模型.对仿真过程中的任务开始、故障时刻、维修时间的抽样进行了分析，给出了抽样公式.以军用飞机RMS指标和使用保障方案作为仿真输入，反复迭代计算获得一族使用可用度与RMS参数的关系曲线，再综合权衡获得合理的使用可用度和相关RMS指标.给出了可靠性仿真的算法流程和相关的计算公式，并以案例验证了该方法的可行性.仿真模型具有通用性，可根据实际情况修改统计公式，满足不同参数的论证需求.

关 键 词：军用飞机；论证；仿真；使用可用度

中图分类号：TP 391.9

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2006)01-0112-05

Operational availability demonstration of military airplane based on simulation

Jiao Jian Wang Zili

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

Abstract: Operational availability (A_O) is an important top parameter of military airplane RMS (reliability, maintainability and supportability). In order to obtain reasonable and valid A_O, based on characters of demonstration stage, a simulation model using Monte-Carlo method and queue theory was constructed by integrating the mission requirements, initial operations and support concept of military airplane and RMS data from similar systems. The sample methods of mission start, failure time and repair time were analyzed, and the sample formulas were presented. The model requires military airplane RMS data and operation maintenance scheme as input data, and calculates iteratively a family of relative curves between A_O and RMS parameters. Based on analyzing the curves synthetically, the reasonable results could be obtained. The algorithm processes of reliability simulation and relative formulas were presented, and the method was verified by a case as well. The simulation model has general-duty character and can be used for different parameters demonstration by modifying the statistical formulas.

Key words: military airplane; demonstration; simulation; operational availability

1 基本概念

武器装备的可靠性、维修性、保障性RMS(Reliability，Maintainability and Supportability)是与性能同等重要的战术技术指标，体现了装备的质量优劣，已经成为新研装备论证的重要内容之一.装备RMS要求论证的核心是在任务需求与经济技术条件之间进行权衡，是一个反复迭代、不断优化、综合权衡的过程.由RMS指标论证通用过程[1]可知，论证的第一步是确定装备RMS顶层指标，只有明确了顶层参数指标，才能进一步通过分解转换获得各类RMS指标(包括使用参数和合同参数).

对于军用飞机来说，反映战备完好性和任务

收稿日期：2004-10-28

作者简介：焦 健(1974—)，男，河北赞皇人，硕士生，jjiao1974@hotmail.com.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

成功性的 RMS 顶层参数有 10 多种,不同国家、军兵种选择的参数各不相同.根据我军实际情况和使用惯例,军用飞机顶层参数是战备完好性参数,平时选择使用可用度 A_O,战时选择出动架次率 SGR(Sortie Gerneration Rate).使用可用度 A_O 是反映飞机能工作时间与不能工作时间关系的一种可用性参数,常用度量方法为:飞机的能工作时间与能工作时间、不能工作时间的和之比.其表达式为

$$A_O = \frac{\text{能工作时间}}{\text{能工作时间} + \text{不能工作时间}} = \frac{T_O + T_S}{T_O + T_S + T_M + T_{LD}} \quad (1)$$

其中,T_O 为工作时间;T_S 为待命时间;T_M 为维修时间(包括预防性维修和故障维修);T_{LD} 为保障延误时间.

使用可用度论证的基本过程是根据作战任务分析,对军用飞机的 A_O 提出初步要求为起点,然后利用 A_O 分解出的 RMS 参数来确定其可行性,自上而下反复多次迭代,最后确定合理的指标值.

对于包括军用飞机在内的复杂可修系统来说,分系统、设备的故障分布各不相同,常规解析方法求解难度较大,通常采用仿真方法确定各类可靠性指标[2].复杂可修系统的可靠性仿真,目前国内外已进行了大量研究,但这些仿真模型往往没有考虑系统的任务需求和任务执行逻辑[3~5],不符合使用可用度等顶层参数的论证要求;或者要求对系统结构深入了解,以便建立可靠性框图或故障树仿真求解[4,6],与论证阶段缺乏详细信息的现实相矛盾.参考文献[7]对民用飞机的任务流程、故障维修、后勤保障等过程有详尽的分析,但与军用飞机的实际情况存在一定差别.本文假定已经确定了 A_O 的初步要求,试图从军用飞机执行任务和使用保障出发,综合考虑任务需求、初始保障方案和相似装备 RMS 指标等信息构建模型,利用仿真技术论证军用飞机的使用可用度,并在此基础上进行灵敏度分析,以便论证人员进行综合权衡.

2　仿真模型

2.1　总体仿真逻辑

系统可靠性仿真的关键是建立仿真模型.军用飞机使用可用度作为顶层参数,直接体现了飞机的作战效能,因此仿真模型必须尽可能模拟实际使用作战情况.军用飞机,特别是战斗机,总是以机群为作战单位,因此本文以机群为研究对象,根据飞机的实际任务、训练需求,确定执行任务所需的飞机数量和出动架次,再根据飞机的典型任务剖面以及论证阶段确定的初始保障方案,确定飞机执行任务时间和维修保障流程.模型的总体仿真逻辑见图 1,其中一天任务执行仿真流程见图 2.

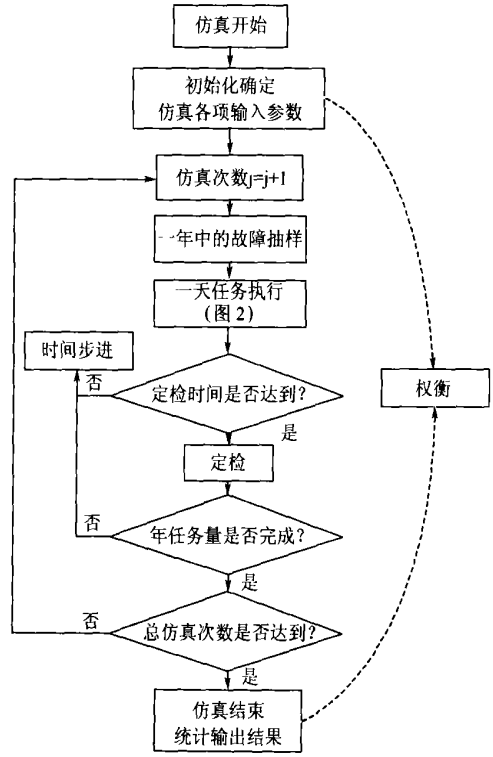


图 1　仿真总流程图

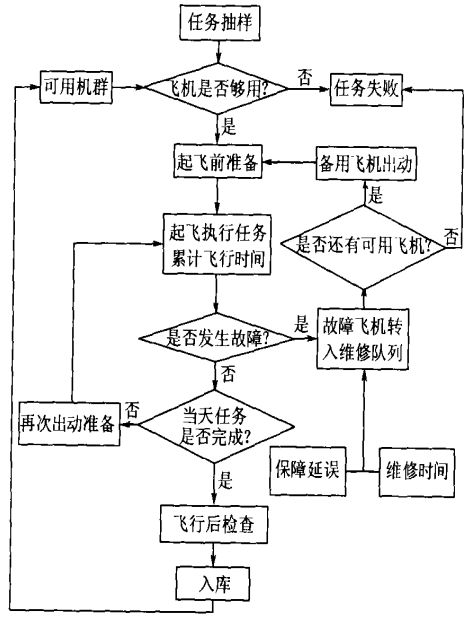


图 2　一天任务执行流程图

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

1) 仿真开始首先进行系统初始化,确定各项输入值.包括:典型任务剖面执行时间 T_P,执行任务所需飞机数量和出动架次及各自所占比例,各项RMS指标输入值,定期检查时间间隔 t_{SR} 和定期检查时间 T_{SR},仿真总次数 N 等;

2) 在第 j 次仿真过程中,首先进行故障抽样生成 K 次故障间隔时间 T_i ($i=1,2,\cdots,K$),K 为满足下式的最小整数:

$$\sum_{i=1}^{K+1} T_i > n_p \times T \tag{2}$$

其中,n_p 为机群飞机数量;T 为单架飞机的年平均飞行时间;

3) 开始执行任务.每次执行任务时,抽样获得任务到达时间和本次任务所需飞机数量及出动架次数,判断累计飞行时间 t 是否到达故障时刻,即依次判断

$$\sum_{i=1}^{K} T_i \leqslant t \quad i=1,2,\cdots,K \tag{3}$$

是否成立.若成立,则认为最近一次出动的飞机发生故障,出动备用飞机继续执行任务(如无备用飞机,则任务失败),故障飞机转入维修队列,执行第4)步;若不成立,则飞行时间累加,飞机转入可用机库,等待下一次任务.重复第3)步直到

$$t \geqslant t_{SR} \tag{4}$$

成立,转第5)步;

4) 故障飞机在维修队列中采用先进先出规则,在维修队列中等候直到开始维修,分别抽样获得保障延误时间 T_L 和故障维修时间 T_R.修复的飞机转入可用机库,转第3)步,等待下一次任务;

5) 飞机进行定期检查维护.当

$$t \geqslant n_p \times T_{Total} \tag{5}$$

(T_{Total} 为飞机年平均使用时间)第 j 次仿真结束,否则转第3)步;

6) 重复执行仿真过程直至达到仿真总次数 N,统计计算 A_O 及其他参数.据式(1)可得 A_O 的统计表达式

$$A_O = \left[N \times n_P \times (T_{Total} + T_S) - \sum T_W - \sum T_L - \sum T_R - \sum T_C \right] \Big\backslash [N \times n_P \times (T_{Total} + T_S)] \tag{6}$$

其中,T_S 为飞机待命时间;T_W 为故障飞机在维修队列中的等待时间;T_C 为飞行前后检查时间、再次出动准备时间以及定检时间之和.

将计算结果与作战效果以及经济技术条件相权衡,可对输入的指标加以调整后再次进行仿真,直到获得合理的可以接受的使用可用度.

2.2 任务抽样

由任务需求分析,获得新研飞机的典型任务剖面,确定任务持续时间.假设在每天24小时内任务到达时间服从均匀分布.每次任务飞机数量和出动架次及比例可由统计获得,例如某任务剖面可能的出动架次数有(5,4,3,2,1),对应的比例为(5.6%,20.5%,30.1%,24.9%,18.9%).利用随机数即可获得所需的任务抽样.

2.3 故障抽样

故障严重程度以及发生频率直接决定了飞机对维修能力的要求,故障抽样机制只有尽可能符合实际情况才能保证仿真结果的准确性.如果对飞机的结构充分了解,建立可靠性框图或故障树,可对飞机各系统(或设备)的故障进行抽样计算获得整机故障状态,但在论证阶段一般不可能掌握新研飞机的详细信息,并且这种方法对各类历史数据也有很高要求,考虑到我国实际情况,需采取其他变通方法.

军用飞机在实际使用过程中,通常是以相同机型组成的机群作为战斗单元.机群中飞机数量较多,每架飞机显然都服从相同的寿命分布,且不同飞机发生故障相互独立,因此可认为整个机群故障服从指数分布.美国RAND公司Carl J. Dahlman等人对机群故障的指数分布进行了仿真验证[8],采用指数分布进行抽样与实际故障状况基本吻合,在论证阶段缺乏数据的情况下,机群故障服从指数分布的假设是可以接受的.在仿真过程中,为整个机群定义一个统一的时钟.每次任务到达时,根据时钟步进判断飞机是否发生故障.当累计时钟到达故障时刻时,最近一次出动的飞机被认为发生故障,转入维修队列.由式(2)可得飞机故障时间抽样为

$$T_i = T_{i-1} - \frac{1}{\lambda}\ln(1-\eta) \tag{7}$$

其中,T_i 为第 i 次抽样获得的故障时间,$T_0=0$;λ 为飞机故障率,取 $1/MFHBF$;η 为随机数.

在论证阶段,一般对飞机进行系统级划分,因此对于故障飞机,再根据各系统发生故障的比例(由历史数据统计获得)进行抽样确定各系统的故障状态.通过对仿真结果的统计计算可得到与飞机 A_O 相匹配的各系统平均故障间隔时间.

2.4 维修仿真

军用飞机的维修分为预防性维修和修复性维

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

修(故障维修).预防性维修主要包括:飞行前后检查、再次出动准备、有寿件更换、定期检查等工作.恰当地确定预防性维修间隔期将直接影响到装备的安全性和经济性.考虑到论证阶段缺乏飞机详细信息的实际情况,重点考察飞行前后检查、再次出动准备和定期检查.预防性维修的时间安排通常在制定综合保障方案时确定,其时间一般是固定的,例如每隔 50 个飞行小时进行一次定期检查,季节交替时进行换季维护等.因此在仿真过程中可将各类预防性维修时间看作常量.

与预防性维修不同,故障维修时间则是一个服从某种分布的随机变量.

1) 故障修复时间

军用飞机故障维修采用三级维修体制,维修方式有原位修理和离位修理,维修策略则包括备件更换、串件更换以及维修次序优先等级划分等.随着飞机研制进程,需对上述维修制度逐步细化,但在 A_O 论证阶段则只需考虑基层级维修.

故障维修过程实质上是一个排队系统,按照前述抽样原则确定的故障飞机,根据发生故障的不同系统转入相应的机械、航电、飞控、军械、特设、救生等专业维修队列,按照预定的排队规则(按故障系统优先级或先进先出)依次进行维修,故障飞机在维修队列中接受"服务"的时间分为综合保障延误时间和故障修复时间两部分.其中,设故障修复时间服从对数正态分布,修复时间 T_R 的抽样为

$$T_R = \exp[\mu + \sigma \sqrt{-2\ln \eta_1} \times \cos(2\pi \times \eta_2)] \tag{8}$$

其中,μ 和 σ 为统计获得的对数正态分布的参数;η_1 和 η_2 为随机数;

2) 保障延误时间

保障延误时间 LDT(Logistic Delay Time)是指维修过程中除故障修复时间以外所有为修复故障而等待的延误时间.LDT 是飞机不能工作的主要原因之一,主要包括备件延误、保障设备延误、技术资料延误以及维修人员延误等.其中备件延误占主导因素.在论证阶段,飞机只进行系统级划分,还无法明确备件库存要求.可根据相似装备确定初始备件满足率 P_S,对于外场具有的备件,可以认为保障延误时间 T_{LD1} 很短(1 h 以内)或忽略不记;对于外场没有的备件,由于要向上级部门申请甚至临时购买,此时的保障延误时间 T_{LD2} 很可能会数天以上.T_{LD1} 和 T_{LD2} 由经验数据确定.则故障飞机的保障延误时间 T_L 可表示为

$$T_L = \begin{cases} T_{LD1} & 0 < \eta \leqslant P_S \\ T_{LD2} & P_S < \eta \leqslant 1 \end{cases} \tag{9}$$

其中,η 为随机数.

将抽样获得每次故障维修活动的保障延误时间 T_L 统计计算,并与仿真结果(使用可用度)进行权衡得到合理的平均保障延误时间 MLDT(Mean Logistic Delay Time).在飞机的设计阶段,可利用该指标进一步确定备件库存及相应管理制度.

3　实　例

利用 VB6.0 编程实现上述仿真模型,仿真输入见表 1.

表 1　仿真输入参数

飞机 RMS 参数	使用保障方案
MFHBF 飞机各系统故障比例 MTTR 及其方差 备件满足率 外场保障延误时间	典型任务剖面 出动架次及比例 飞机年平均飞行小时 飞机待命时间 飞行前后准备时间 再次出动准备时间 定检间隔时间 平均定检时间 维修队数量

注:MFHBF 为平均故障间飞行小时;MTTR 为平均修复时间.

在 10 架飞机,单机年平均飞行小时为 200,外场维修人员划分为 4 个维修专业,外场备件满足率为 90%的条件下,进行仿真得到结果见图 3.

根据实际技术和经济条件进行权衡,可以获得飞机满足要求的使用可用度以及相对应的 RMS 参数指标.

同时,A_O 作为飞机的顶层参数,体现了 RMS 指标与任务需求、使用方案的综合作用,不同的使用方案必然会得到不同的 A_O 统计数据.图 4～图 6分别是飞机年平均使用时间和飞行小时以及

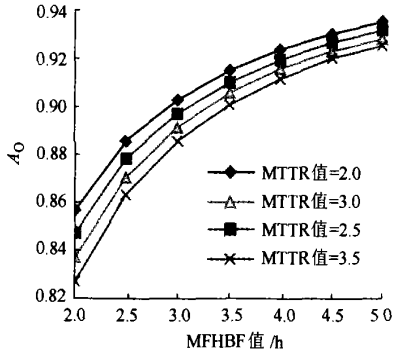


图 3　MFHBF,MTTR 与 A_O 的关系

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

维修队数量对 A_O 影响的仿真分析.

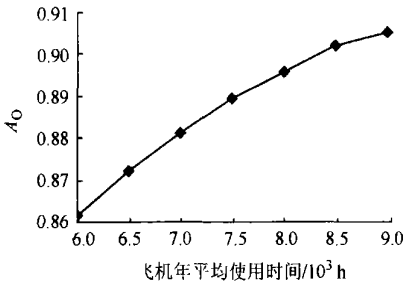


图4 MFHBF 值=3.5h，MTTR 值=3h，平均年飞行 200h，4 个维修专业

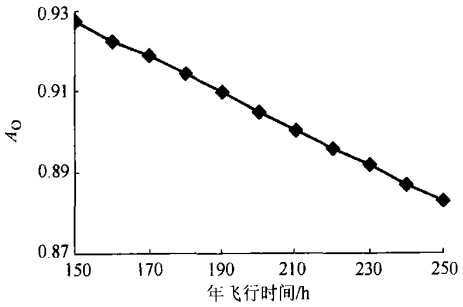


图5 MFHBF 值=3.5h，MTTR 值=3h，年使用时间 8760h，4 个维修专业

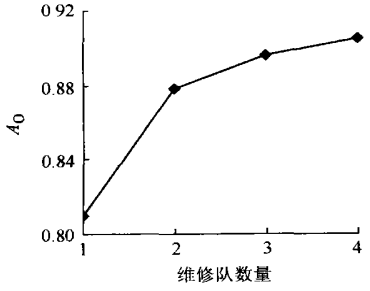


图6 MFHBF 值=3.5h，MTTR 值=3h，年使用时间 8760h，年飞行小时 200h

4 结束语

采用仿真模型对军用飞机的使用可用度进行论证，可以将不同方案输入模型，利用仿真进行综合权衡，确定最优方案，保证了各项论证指标的技术先进性和可行性.模型的建立，综合考虑了飞机的可靠性、任务执行和使用保障等信息，仿真模型具有通用性，可根据实际情况修改统计公式，满足不同参数的论证需要.

参考文献（References）

[1] 王自力，屠庆慈，曾声奎. 武器装备可靠性、维修性、保障性要求论证程序和方法综述[J]. 可靠性工程，2004，3(1)：1～6
Wang Zili，Tu Qingci，Zeng Shengkui. Survey of RMS demonstration procedure and methods of weapon system[J]. Reliability Engineering，2004，3(1)：1～6(in Chinese)

[2] 杨为民，盛一兴. 系统可靠性数字仿真[M]. 北京：北京航空航天大学出版社，1990.336～394
Yang Weimin，Sheng Yixing. Digital simulation of system reliability[M]. Beijing：Press of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，1990. 336～394(in Chinese)

[3] Stephen W Ormon，C Richard Cassady，Allen G Greenwood. A simulation-based reliability prediction model for conceptual design[A]. In：2001 PROCEEDINICS Annual RELIABILITY and MAINTAINABILITY Symposium[C]. IEEE，2001. 433～436

[4] Ofelia Gonzalez-Vega，Joseph W Foster Ⅲ，Gary L Hogg. A simulation program to model effects of logistics on R&M of complex system[A]. In：1988 Proceedings annual reliability and maintainability symposium[C]. IEEE，1988. 306～313

[5] 王武宏，孙逢春，李晓雷. 复杂可修系统可信度的数字仿真方法[J]. 系统工程理论与实践，2001，21(7)：110～113
Wang Wuhong，Sun Fengchun，Li Xiaolei. A numeral simulation approach to the analysis of dependability of complex repairable system[J]. Systems Engineering—Theory & Practice，2001，21(7)：110～113(in Chinese)

[6] 杨宇航，冯允成. 复杂可修系统可靠性维修性综合仿真研究[J]. 系统仿真学报，2002，14(8)：978～982
Yang Yuhang，Feng Yuncheng. Complex repairable system reliability and maintainability simulation[J]. Journal of System Simulation，2002，14(8)：978～982(in Chinese)

[7] 杨为民. 民机整机系统可靠性和维修性(课题研究资料汇编第四册)[R]. 北京：北京航空航天大学可靠性工程研究所，1990
Yang Weimin. System reliability and maintainability of civil airplane (research report 4)[R]. Beijing：Institute of Reliability Engineering，Beijing University of Aeronautics and Astronautics，1990(in Chinese)

[8] Carl J Dahlman，Robert Kerchner，David E Thaler. Setting requirements for maintenance manpower in the U.S. Air Force[M]. Santa Monica：RAND，2002.161～178

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net