基于保障系统三维模型的飞机RMS仿真分析方法

栗金卓 王乃超 马 麟

(北京航空航天大学 经济管理学院，北京 100191) (北京航空航天大学 可靠性与系统工程学院，北京 100191)

摘 要：利用仿真方法研究军用飞机可靠性维修性保障性(RMS，Reliability，Maintainability and Supportability)设计指标确定问题.介绍了保障系统三维模型的内涵，结合三维模型原理和模块化设计原则建立了飞机RMS仿真分析框架，对框架内各模块功能及内涵给予了介绍.给出了仿真分析总体流程，以及对仿真数据进行后处理获得评价参数的计算方法.运用蒙特卡罗仿真方法对军用飞机的RMS设计指标进行实例分析，获得了满足保障效能要求的RMS设计指标方案集，对研制阶段装备设计指标论证有重要的参考价值.

关 键 词：保障系统；可靠性维修性保障性；保障效能；可用度；仿真；权衡

中图分类号：V 215.7

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2010)12-1485-05

RMS research based on three dimension model of support system with simulation method for military aircraft

Li Jinzhuo

(School of Economics and Management, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Wang Naichao Ma Lin

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

Abstract: The issue of how to obtain reasonable reliability, maintainability and supportability (RMS) design parameters in the development of military aircraft was researched. The framework of RMS design parameters simulation model was constructed via the three-dimensional model of support system and the rule of modular design principle. The framework contains four modules includinag mission module, function model, operations and maintenance model, support organization module and which are the kernel of the framework. The relationship and the content of data streams between these modular were expatiated. According to the definition of evaluation parameters, the method of how to calculate them using simulation data was given. To verify the feasibility and validity of the simulation framework, the Monte Carlo simulation is used in the trade-off RMS design parameters and a family of design values fulfilling the constraints of support effectiveness requirements is obtained.

Key words: support system; reliability, maintainability and supportability(RMS); support efficiency; availability; simulation; tradeoff

军用飞机投入使用后，能否充分发挥战斗力、达到规定的战备完好能力和任务持续能力要求，取决于军用飞机的设计特性以及与其配套的保障系统效能发挥的程度.可靠性维修性保障性(RMS，Reliability，Maintainability and Supportability)作为军用飞机重要的设计特性，其设计参数量值选取得是否恰当，将直接影响保障效能的发挥效果.因此，在研制阶段对RMS设计指标进行权衡分析非常重要.

对于与军用飞机类似的复杂可修系统，由于

收稿日期：2010-07-19

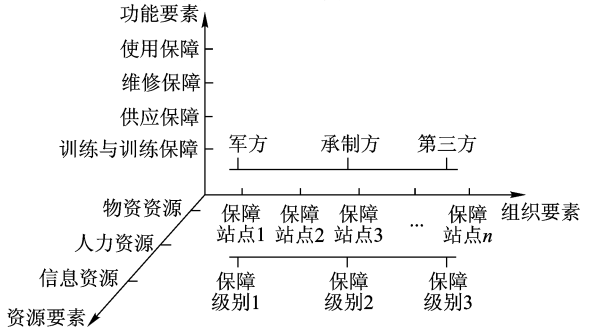
作者简介：栗金卓(1962—)，男，北京人，博士生，tian_jia_zhuang@163.com.

分系统、设备的故障分布各不相同，因此很难用解析方法确定设计参数. 对于蒙特卡洛仿真，国内外已进行了大量研究，但在效能仿真方面，涉及保障效能仿真的较少[1-6]，而相关仿真模型又较少考虑装备的任务需求、保障组织结构及保障资源配置方案对顶层效能指标的影响[7-10]. 文献[11—13]开展的研究要求对系统结构有较深入的了解，以支持可靠性框图或故障树的建立，便于仿真分析. 文献[14]设计了评估复杂可维修系统可靠度、瞬态可用度的蒙特卡罗方法，在计算可靠度和瞬态可用度的点估计时采用加权统计估计蒙特卡罗方法. 文献[15]建立了基于仿真方法的保障效能分析模型，文中模型针对导弹的任务可靠度以及使用与维修保障费用进行了权衡分析. 文献[16]建立军用飞机使用可用度仿真论证模型，文中针对仿真逻辑、故障抽样以及维修进行了较为详细的论述.

本文首先以保障系统三维模型为基础建立了军用飞机仿真模型，然后运用状态分类原理给出了仿真数据分析思路，最后，在示例中结合军用飞机的保障系统方案对其 RMS 设计指标进行权衡分析，获得了满足效能指标要求的方案集.

1 仿真模型

保障系统是使用与维修装备所需的所有保障资源及其管理的有机组合，其功能是要维持装备的正常使用，保障系统需要在装备使用时保证装备能够操作动用，在装备故障时能够及时修复装备，以及由此引发的器材供应和人员培训. 为实现保障系统的功能，需要在相应的保障组织开展相应的保障活动，执行这些活动需要使用或消耗一定的保障资源，将相应的保障资源部署到保障组织中，就为保障系统功能的正常履行奠定了物质基础. 因此，保障功能、保障资源和保障组织构成了保障系统的 3 类要素，如图 1 所示. 图 1 用三维结构来描述保障系统的构成要素，将其分为功能要素、资源要素和组织要素. 三者通过保障活动关联起来并实现保障系统的保障功能.



1.1 任务模型

军用飞机执行任务时存在将任务分配到飞机的过程，此过程是将设定的任务要求反映到执行任务的飞机上. 任务配置过程见图 2.

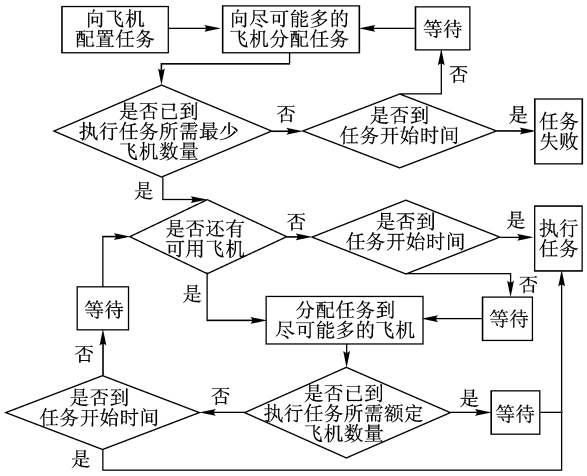


图 2 任务配置过程

1.2 功能模型

军用飞机是具有功能的有机整体，它由系统、分系统、部件及子部件组成，军用飞机层次结构如图 3 所示.

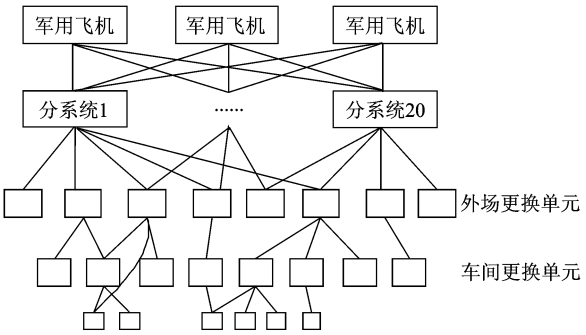


图 3 军用飞机功能层次分解结构

1.3 使用与维修保障模型

军用飞机的保障活动可分为使用保障活动和维修保障活动，具体内容可分为：任务前准备、任务后周转以及修复性维修(CM，Corrective Maintenance)和预防性维修(PM，Preventive Maintenance).

军用飞机的任务前准备活动内容主要包括：①外观检查；②充填物(燃油、液压油、滑油、酒精、氧气、氮气)检查，必要时添加；③通电检查；④根据任务需要装填人员和物资；⑤任务数据加载；⑥惯导对准；⑦清洁保养.

军用飞机的任务后周转活动内容主要包括：①外观检查；②充填物(燃油、液压油、滑油、酒精、氧气、氮气)检查，必要时添加；③任务、视频和飞参数据卸载和处理；④清洁保养.

军用飞机维修保障活动包括在各级维修站对飞机本身及部件进行的修复性维修活动以及按照维修大纲开展的各项预防性维修工作.军用飞机修复性维修过程见图 4.

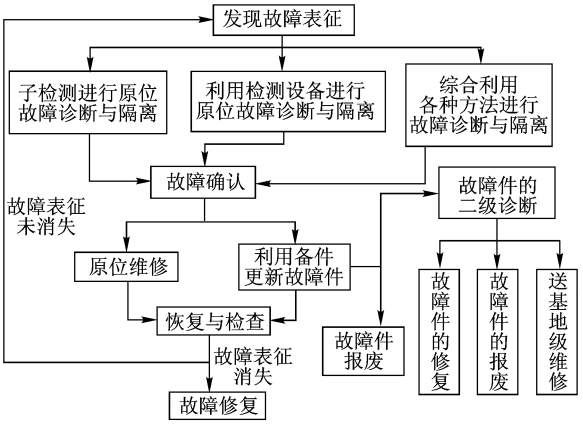


图 4　修复性维修过程

1.4　保障组织模型

保障组织描述了保障系统中各保障站点间的逻辑关系.保障站点是军用飞机进行使用与维修保障的地点,对其提供使用维护、修复性维修、预防性维修等维修保障活动.根据保障站点在保障组织中所处的位置和作用可以构建保障组织结构图,抽象的维修保障组织结构图如图 5 所示.

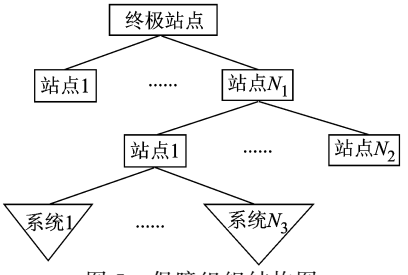


图 5　保障组织结构图

图 5 从上到下可以分为 3 层:第 1 层是终极保障站点,任何到达终极站点的维修需求都会被满足;第 2 层是中继级站点,它们接受上级站点提供维修保障服务,并向下级站点提供维修保障服务;第 3 层是外场级站点,它们接受中继级站点提供维修保障服务,并直接面向军用飞机提供使用保障与维修保障服务.在保障组织结构图中,各层次站点构成保障层面上的父子关系.

1.5　仿真总体流程

军用飞机 RMS 仿真总体流程如图 6 所示.在图 6 中,军用飞机根据任务想定执行任务,在执行任务过程中军用飞机可能会发生故障,发生严重故障的飞机会返回并送入维修站进行维修.当部分飞机发生故障返回后,如果仍在执行任务的飞机满足任务执行的条件则继续执行任务,否则

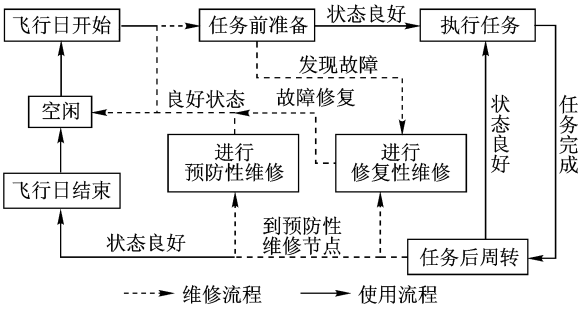


图 6　仿真运转逻辑流程

任务取消;任务执行完毕后,返回的飞机会被检查,发现故障的飞机被送入维修站进行维修,没有故障的飞机被安排进入任务队列或进入空闲状态.

在仿真运转流程中,军用飞机的任务信息、功能结构信息、保障资源、保障组织等信息会输入到流程中,如图 7 所示.

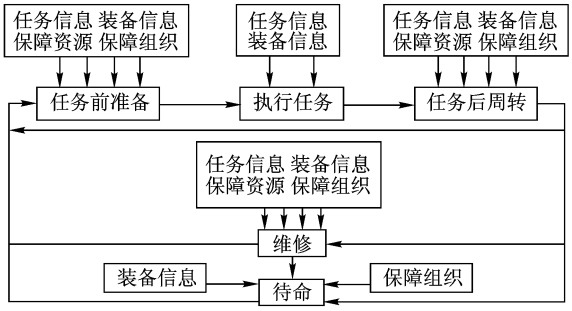


图 7　保障效能仿真信息流图

2　仿真分析思路

本文中保障效能顶层指标为使用可用度,为方便分析,根据使用可用度定义可以建立军用飞机系统时间组成,如图 8 所示.

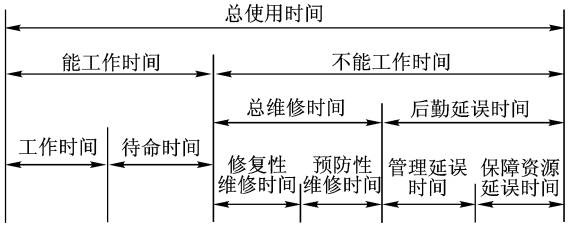


图 8　军用飞机系统时间组成

依据图 8,可以将军用飞机分为不同的状态,见图 9.

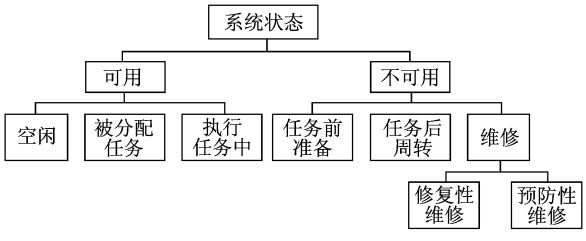


图 9　系统状态分类

定义 N_a 表示可用装备数量，N_u 表示不可用装备数量，N_a 和 N_u 可根据图 9 所示装备分类计算得到. 使用可用度的计算公式如下：

$$A_o=\frac{\int_0^T N_a(t)\mathrm{d}t}{\int_0^T N_a(t)\mathrm{d}t+\int_0^T N_u(t)\mathrm{d}t}=\frac{\sum_{t=0,\Delta t}^{T} N_a(t)}{\sum_{t=0,\Delta t}^{T} N_a+\sum_{t=0,\Delta t}^{T} N_u(t)} \tag{1}$$

式中，A_o 为使用可用度；T 为总时长；Δt 为仿真步长.

通过在仿真中获得军用飞机处于不同状态的数量和时间，可以计算得到军用飞机的使用可用度. 在累计多次仿真的基础上，可以获得军用飞机使用可用度的平均值. 在建立仿真流程过程中，本文严格依照军用飞机使用与维修保障流程建立仿真模型，这在一定程度上保证了仿真结果的真实、可靠.

3 仿真示例

3.1 仿真输入

案例中定义军用运输机的年任务时间为 2 000 h，利用率为 0.254. 共用 12 架飞机用于执行任务，单架飞机分系统的可靠性、维修性设计指标以及运行比、环境系数详见表 1.

表 1 军用飞机分系统设计参数

编号	名称	MTBF/h	运行比	环境系数	MTTR/min
1	机电管理系统	880	1.3	1.1	30
2	救生系统	6 050	0.2	1.1	30
3	空投空降	611	0.4	1.1	40
4	货运系统	611	0.4	1.1	30
5	起落架系统	200	1	1.1	80
6	液压系统	507	1.1	1.1	90
7	环境防护系统	243	1	1.1	30
8	防火系统	1 456	1.1	1.1	30
9	照明系统	205	1.3	1.1	30
10	动力系统	196	1.1	1.1	90
11	辅助动力系统	644	0.3	1.1	80
12	燃油系统	392	1.1	1.1	60
13	供电系统	721	1.1	1.1	30
14	氧气系统	2 006	1	1	30
15	机体结构	350	1	1.1	80
16	飞行控制系统	108	1.1	1.1	80
17	环控控制系统	192	1.1	1.1	40
18	航电系统	65	1.1	1.1	40
19	生活设施系统	2 459	0.9	1.1	30
20	水/废水系统	3 646	0.9	1.1	30

注：MTBF(Mean-Time-Between-Failures)为平均故障间隔时间；MTTR(Mean-Time-to-Repair)为平均修复时间.

军用飞机预防性维修包括 A 检和 C 检. A 检每飞行 300 h 任务执行一次，地点在外场，时间为 72 h；C 检每飞行 3 600 h 任务执行一次，地点在中继级站点，时间为 480 h.

3.2 仿真结果及灵敏性分析

依据输入数据仿真得到军用飞机的使用可用度为 0.78，未达到 0.9 的设计指标要求值. 为此，需要对设计指标进行调整，调整对象为 MTBF、PM 时间、CM 时间、PM 间隔期. 图中调整系数的含义为指标调整的比例，即指标现值＝指标原值×调整系数. 因此，当调整系数小于 1.0 时，分别表示系统可靠性提高、PM 时间缩短、CM 时间缩短；而当调整系数大于 1.0 时含义恰恰相反，表示可靠性降低、PM 时间增加、CM 时间增加. 调整后结果见图 10.

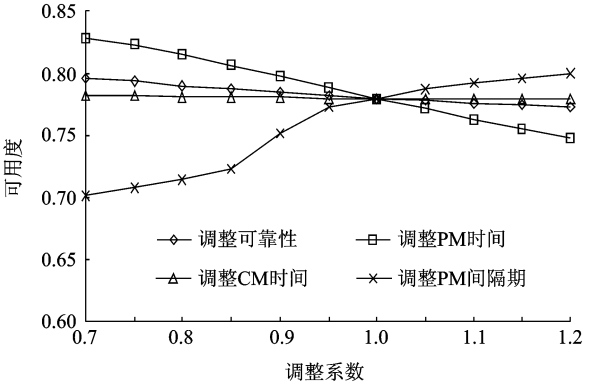


图 10 使用可用度随指标变化趋势

从图 10 可以看出使用可用度随可靠性、PM 时间、CM 时间变化近似成线性改变，而其随 PM 间隔期变化则不太规则. 在设计方案中，整机的 MTBF 约为 13 h，整机的 MTTR 约为 55 min. MTTR 相对 MTBF 较小，因此调整 CM 时间对整机可用度影响不大，曲线变化最为平缓. 在设计方案中系统每次 PM 时间均较长，因此，可用度随其变化均较 MTBF 和 MTTR 大. 在图 10 中，可用度随 PM 间隔期变化较为特殊，曲线可分为 3 段，3 段均近似成线性变化，但是第 2 段(中间段)的变化趋势明显大于第 1 段和第 3 段. 这说明在当前设计方案下(保持可靠性、维修性、预防性维修时间设计参数不变)，可用度对于 PM 间隔期的调整在中间段内较为敏感，处于此段范围内的 PM 间隔时间能够显著影响系统使用可用度.

3.3 小 结

以下 4 种方式均可以提高军用飞机的使用可用度，按照提高程度从大到小分别为：①缩短 PM 时间；②增加 PM 间隔期；③提高系统可靠性；④缩短 CM 时间. 考虑到改进方式的可行性和操作难度，可选取①和③作为调整因素，在二者共同作用下获得满足使用可用度指标要求的设计方

案.表 2 中所列方案均满足使用可用度 0.9 的设计指标要求,而与不同可用度值对应的调整系数值就是可以考虑的调整策略.军用飞机设计人员可以比对不同方案的优劣和可行性,从中选择可行的调整方案以满足使用可用度设计指标要求.

表 2　满足使用可用度要求的不同设计方案

使用可用度		预防性维修时间调整系数	
		0.3	0.35
可靠性指标调整系数	0.6	0.915	0.903
	0.65	0.915	0.901
	0.7	0.911	不符合
	0.75	0.910	不符合
	0.8	0.908	不符合
	0.85	0.907	不符合
	0.9	0.906	不符合
	0.95	0.905	不符合
	1.0	0.904	不符合

4　结 束 语

运用保障系统三维模型原理采用仿真方法对军用飞机 RMS 设计指标进行论证的过程,验证了将三维模型用于仿真分析的可行性.分析过程中的敏感性分析发现了影响军用飞机使用可用度的关键因素,这对调整、完善与改进军用飞机设计、使用与维修保障方案改进具有一定的借鉴和参考意义.此外,文中仿真示例的建立,综合考虑了军用运输机的可靠性、维修性、保障性及任务等信息,仿真模型具有一定的通用型,可根据实际情况修改,以满足不同参数的论证要求.

参考文献 (References)

[1] 胡鹏,黄高明,李敬辉.基于 OPN 的舰载对空搜索雷达作战效能仿真分析[J].舰船科学技术,2009,31(8):115－119
Hu Peng, Huang Gaoming, Li Jinghui. Effectiveness simulation analysis of shipborne aerial search radar based on OPN [J]. Ship Science and Technology, 2009, 31(8): 115－119(in Chinese)

[2] 耿振余,毕义明.基于系统动力学的导弹体系作战效能仿真研究[J].现代防御技术,2005,33(6):1－4
Geng Zhenyu, Bi Yiming. Research on combat effectiveness simulation of missile system based on system dynamic [J]. Modern Deffence Technology, 2005, 33(6): 1－4(in Chinese)

[3] 张俊华,杨根,徐青.雷达探测空间目标效能仿真系统设计与实现[J].计算机工程,2009,35(22):248－250
Zhang Junhua, Yang Gen, Xu Qing. Design and realization of radar efficiency simulation system for detecting space target [J]. Computer Engineering, 2009, 35(22): 248－250(in Chinese)

[4] Mancini A, Cesetti A, Iuale A, et al. A framework for simulation and testing of UAVs in cooperative scenarios [J]. J Intell Robot Syst, 2009, 54(1/2/3): 307－329

[5] José Villén-Altamirano. RESTRAT simulation of non-Markov consecutive-*k*-out-of-*n* F: repairable systems[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2010, 95(3): 247－254

[6] Ke J C, Su Z L, Wang K H, et al. Simulation inferences for an availability system with general repair distribution and imperfect fault coverage [J]. Simulation Modeling Practice and Theory, 2010, 18(3): 338－347

[7] Zio E, Podofillini L. Integrated optimization of system design and spare parts allocation by means of multi objective genetic algorithms and Monte Carlo simulation [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: J Risk and Reliability, 2007, 221(1): 67－84

[8] Valentin E C, Verbraeck A. Requirements for domain specific discrete event simulation environments[C]//Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference. Orlando: Winter Simulation Conference, 2005: 654－663

[9] 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)

[10] Cai Jing, Zuo Hongfu, Lü Defeng. Availability simulation of multi-component sys tem based on opportunistic maintenance policy [J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009, 26(3): 219－223

[11] Ofelia G, Joseph W, Gary L. A simulation program to model effects of logistics on R&M of complex system [C]//Reliability and Maintainability Symposium. Los Angeles: IEEE, 1988: 306－313

[12] 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,2002,14(8):978－982
Wang Wuhong, Sun Fengchun, Li Xiaolei. A numeral simulation approach to the analysis of dependability of complex repairable System [J]. Systems Enginerring: Theory & Practice, 2002, 14(8): 978－982(in Chinese)

[13] 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)

[14] 肖钢.评估复杂可维修系统可靠度与瞬态可用度的蒙特卡罗方法[J].兵工学报,2002,23(2):215－218
Xiao Gang. A Monte Carlo method for obtaining reliability and availability confidence limits of complex maintenance system [J]. Acta Armamentarii, 2002, 23(2): 215－218(in Chinese)

[15] Gregory C, Rodney E. Simulation modeling for military logistics and supportability studies[C]//Proceeding of the 1991 Winter Simulation Conference. Phoenix: IEEE Computer Society, 1991: 485－490

[16] 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)

(编　辑:李　晶)