

doi: 10.7690/bgzd.2016.01.007

基于蒙特卡罗法的装备保障方案评估

王利明¹, 史凤隆¹, 祝华远¹, 贾向军¹, 衣冠琛², 郑 苏³

- (1. 海军航空工程学院青岛校区, 山东 青岛 266041;
2. 中国人民解放军 92514 部队, 山东 烟台 264007;
3. 中国人民解放军 91911 部队, 海南 三亚 572000)

摘要: 为有效解决部队当前仅仅依靠保障经验对装备保障方案进行评估的问题, 提出一种基于蒙特卡罗法的装备保障方案评估方法, 综合考虑工序逻辑约束、保障车辆约束和飞机部件可靠性等因素的影响, 对 3 套典型的保障方案进行了实例分析, 得到不同保障车辆等保障资源配置对保障工作及时性的影响程度。仿真结果表明, 该方法能够明确显示各套装备保障方案的优劣。

关键词: 蒙特卡罗; 航空装备; 保障方案; 评估

中图分类号: TJ03 **文献标志码:** A

Equipment Support Program Evaluation Based on Monte Carlo Method

Wang Liming¹, Shi Fenglong¹, Zhu Huayuan¹, Jia Xiangjun¹, Yi Guanchen², Zheng Su³

- (1. Qingdao Branch, Naval Aeronautical Engineering Institute, Qingdao 266041, China;
2. No. 92514 Unit of PLA, Yantai 264007, China; 3. No. 91911 Unit of PLA, Sanya 572000, China)

Abstract: For effectively resolving the actual military rely on experience to evaluate equipment support plan, put forward a kind of equipment support scheme evaluation method based on Monte Carlo method, taken the process logic, the guarantee vehicle and the reliability, the influence of such factors as three sets of typical protection scheme for the case analysis, different support vehicles and other support resource allocation to the influence degree of the security work timeliness. The simulation results show that the method can clearly show the advantages and disadvantages of various sets of equipment support scheme.

Keywords: Monte Carlo method; aviation equipment; support program; evaluation

0 引言

随着第三代战机陆续装备部队, 新型飞机的科技含量、信息化水平和保障要求大幅提升, 能够遂行的作战任务更是多样化。在部队的航空装备保障实践中, 精确预计保障资源需求、合理部署保障力量和有效优化保障流程, 摆脱以往仅仅依靠部队实践经验总结或是主观决策的方式, 科学制定任务阶段的装备保障方案是有效形成装备保障能力的重要方面。对装备保障方案进行科学合理的评估, 有利于决策者遴选作战装备保障方案, 提高主战装备的战备完好性和任务成功性, 能够为部队遂行作战装备保障任务提供一个切实可行的实施依据。

目前, 研究装备保障方案方面的文献[1-8]中涉及任务阶段装备保障方案理论的研究还比较少, 主要集中在对论证、研制和平时使用阶段装备保障方案进行评估, 并且任务阶段装备保障方案涉及的不确定性因素较多, 任务的多样化使得评估指标不宜

选取; 因此, 针对任务阶段装备保障方案的评估更是一个难点问题。文中采用仿真的方法, 综合考虑工序逻辑约束、保障车辆约束和飞机部件可靠性等因素的影响, 在具有一定的备份飞机数量的前提下, 运用蒙特卡罗方法对 3 套典型的保障方案进行了实例分析, 得出了不同保障车辆等保障资源配置对保障工作及时性的影响程度, 对部队的实际保障工作具有良好的借鉴作用。

1 蒙特卡罗方法介绍

蒙特卡罗方法^[9-10], 也叫随机抽样模拟或是统计模拟的方法, 是 20 世纪 40 年代由美国 John von Neumann、Nicholas Metropolis 和 Stanislaw Ulam 提出的。它是一种极其重要的数值计算方法, 以概率相关理论为基础, 一般通过计算机产生随机数或是伪随机数来仿真实际生活中的一些随机现象。采用蒙特卡罗方法求解的问题主要有 2 种: 一种是问题本身蕴含着随机性, 可以通过计算机产生随机数来

收稿日期: 2015-07-23; 修回日期: 2015-08-30

基金项目: 海军航空装备保障方案拟制规范(4151B5S)

作者简介: 王利明(1978—), 男, 辽宁人, 硕士, 讲师, 从事军事装备研究。

模拟此类随机性的概率问题，这类问题由于人们只知其发生的概率，但不能准确地把握具体一个现象的状态，而蒙特卡罗方法可以按照事件的概率从中随机进行大量抽样，经过对大子样的抽样数据进行统计分析，作为对这种事件的研究依据；另一种是由于问题复杂多维求解困难，通过将此类问题转化成随机问题，从而获得此类问题的解。运用蒙特卡罗方法解题的主要步骤是根据事件的特点，构造事件的概率过程，然后根据概率分布从中随机抽样进行模拟实验，进而求出此事件的解。

2 装备保障方案

假设××单位根据作战任务的要求，制定了 3 套不同装备保障方案的主要内容如表 1 所示，装备保障方案中的各专业保障流程如表 2~表 5 所示。另外，机务保障人员的编配数量根据装备保障实际设定，每架飞机由一个机组负责，人员按满编考虑。

表 1 ××单位装备保障方案主要内容

方案	准备飞机数量	保障资源配置
1	出动 14 架 备份 2 架	牵引车 7 台，冷气车 2 台，加油车 2 台， 附油车 2 台，电源车 8 台，氧气车 1 台， 空调车 4 台，挂弹车 10 台
2	出动 14 架 备份 3 架	牵引车 10 台，冷气车 3 台，加油车 3 台， 附油车 3 台，电源车 10 台，氧气车 2 台， 空调车 6 台，挂弹车 12 台
3	出动 14 架 备份 1 架	牵引车 5 台，冷气车 2 台，加油车 2 台， 附油车 2 台，电源车 5 台，氧气车 1 台， 空调车 3 台，挂弹车 8 台

表 2 航空机械专业直接机务准备工作项目清单 min

代号	工作项目	最短时间	平均时间	最长时间	保障车辆	紧前工作
A	准备	10	12	15	牵引车	
B	飞行前检查	10	15	20		A
C	补充冷气	5	6	7	冷气车	A
D	装阻力伞	5	8	10		A
E	补加燃油	5	8	10	加油车	A
F	添加附油	5	8	10	附油车	B
G	复查座舱	3	5	8		A
H	装挂武器		—			B-G
I	填写卡片	2	3	5		H
J	清点工具	2	3	5		H

表 3 航空军械专业直接机务准备工作项目清单 min

代号	工作项目	最短时间	平均时间	最长时间	保障车辆	紧前工作
A	飞行前准备	10	12	15	牵引车	
B	军械飞行前检查	8	10	15		A
C	挂弹前通电	5	8	10	电源车	B
D	装挂武器前准备	3	5	8		B
E	装挂武器		—		挂弹车	C、D
F	武器加载	2	3	5	电源车	E
G	填写工作日记	2	3	5		F
H	清点工具	2	3	5		F

表 4 航空特设专业直接机务准备工作项目清单 min

代号	工作项目	最短时间	平均时间	最长时间	保障车辆	紧前工作
A	飞行前准备	10	12	15	牵引车	
B	特设飞行前检查	8	10	15		A
C	补充氧气	2	3	4	氧气车	A
D	特设通电	5	8	10	电源车	B
E	协助装挂武器		—			B-D
F	填写工作日记	2	3	5		E
G	清点工具	2	3	5		E

表 5 综合航电专业直接机务准备工作项目清单 min

代号	工作项目	最短时间	平均时间	最长时间	所需保障车辆	紧前工作
A	飞行前准备	10	12	15	牵引车	
B	航电飞行前检查	5	8	10		A
C	飞参数据加载	2	3	4		B
D	航电通电	10	15	20	空调车 电源车	B
E	协助装挂武器		—			C、D
F	填写工作日记	2	3	5		E
G	清点工具	2	3	5		E

3 仿真设计

1) 模型描述。

将某次仿真过程中的仿真次数设定为 N_{MC} 。第 n 次仿真中，机务保障任务的相关因素表示如下：机务保障任务中飞机数量为 N_{JH} ；主要的保障车辆牵引车、冷气车、加油车、附油车、电源车、氧气车、挂弹车及空调车依次编号为 1~8，保障车辆数量表示为 $N_{BZ} = [N_{BZ_c}]$, $c=1,2,\dots,8$ 。将机务保障工作按专业划分为机械、军械、特设及综合航电 4 个专业，依次编号为 1~4，各专业的组成工序如表 2~表 5 所示，数量表示为 N_{ZY_i} , $i=1,2,3,4$ ；根据以往统计分析各工序持续时间的悲观时间、最可能时间和乐观时间分别表示为 $T_{SS_{i,j}}$, $i=1,2,3,4$; $j=1,2,\dots, N_{ZY_i}$ 。以此为基础应用“三时估计法”产生本次仿真的各架飞机工序持续时间 $T_{SJ_{i,j,k}^{(n)}}$, $k=1,2,\dots, N_{JH}$ ；各工序需要的保障车辆表示为列表形式 $C_{LB_{i,j}}$ ，显然 $C_{LB_{i,j}} \subseteq \{1,2,3,4,5,6,7,8\}$ ；各工序紧前工序表示为列表 JQ_i^j ，内容如表 2~表 5 所示，没有为空；保障过程中各专业可能在飞行前检查和通电检查工序发现飞机部件故障，根据以往的保障数据分析，这里将可能发现飞机故障的工序可靠性表示为成功概率 $P_{GX_i^j}$ ，即飞机故障的可能性，用 $P_{FJ_k^{(n)}}$ 表示此次仿真中第 k 架飞机的成功状态，1 表示成功，0 为失败。

依据图 1 的操作流程，应用网络计划技术中的关键路线法确定各架飞机每个专业的保障工作持续时间，表示为 $T_{ZY_{i,k}}^{(n)}$ 。需要指出的是，挂弹工作需要所有专业的前期工序全部完成之后才可进行，之后各专业继续各自的保障任务。

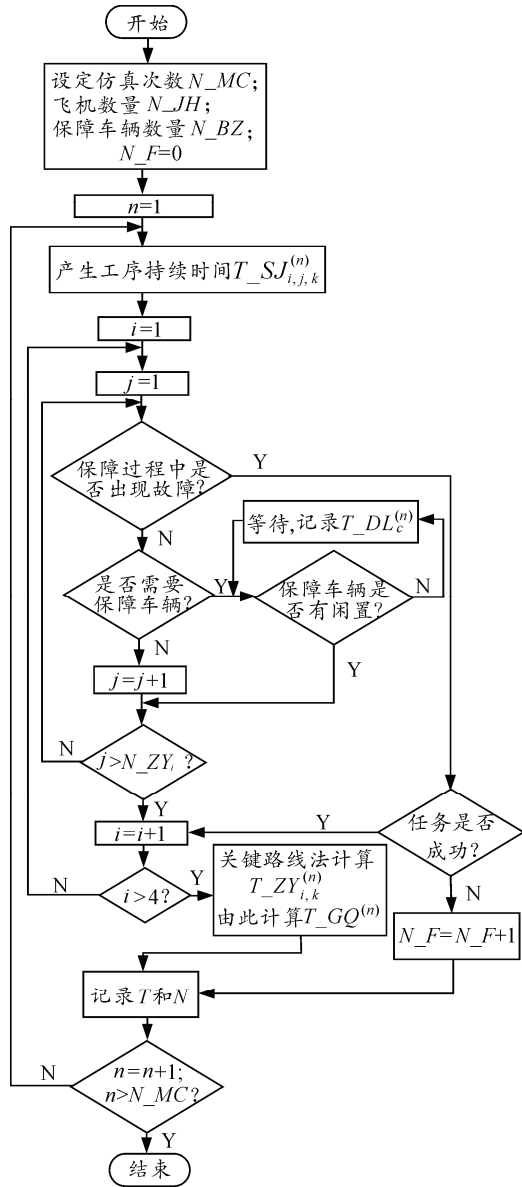


图 1 仿真流程

2) 基本公式算法。

仿真过程中，第 k 架飞机的机务保障时间为：

$$T_{FJ_k}^{(n)} = \max_{i=1}^4 \{T_{ZY_{i,k}}^{(n)}\} \quad (1)$$

即最后完成工作的专业任务持续时间决定了本架飞机的机务保障时间。倘若保障过程中出现工序失败的情况，则此架飞机机务保障任务失败，并且其所有专业的保障工作停止。则此次仿真任务的机务保障时间为：

$$T_{GQ}^{(n)} = \max_{k=1}^{N_{JH}} \{T_{FJ_k}^{(n)}\} \quad (2)$$

以此为基础，如果任务结束时，顺利完成保障工作的飞机数量达到要求的数量，则此次保障任务完成，并且工期为 $T_{GQ}^{(n)}$ ；否则任务失败。工序因保障车辆数量的限制，出现的等待时间记录为 $T_{DL_c}^{(n)}$ 。

依照上述方法仿真 N_{MC} 次，统计获得如下数据：任务失败的总次数 N_F ；保障任务完成时出现的机务保障时间列表 $T = [T_1 T_2 \dots T_x \dots]$ ，以及与之对应的出现次数 $N = [N_1 N_2 \dots N_x \dots]$ ；各型保障车辆造成的平均延误时间为：

$$TD_c = \frac{\sum_{n=1}^{N_{MC}} T_{DL_c}^{(n)}}{N_{MC}} \quad (3)$$

基于 MC 仿真方法的机务保障工作在准备时限内完成的概率计算公式如下：

$$P(T \leq T_S) = \text{Pr}o\{T_* \leq T_S\} = \frac{\sum_{T_x \leq T_S} N_x}{\sum N_x + N_F} \quad (4)$$

式中 T_S 为要求的任务工期。

$$N_{BZ} = \begin{bmatrix} \text{方案1} & \text{方案2} & \text{方案3} \\ 8 & 16 & 6 \\ 3 & 6 & 2 \\ 4 & 8 & 3 \\ 4 & 8 & 3 \\ 16 & 16 & 8 \\ 2 & 4 & 1 \\ 16 & 16 & 6 \\ 8 & 16 & 4 \end{bmatrix}$$

机务保障工作专业划分、数量，以及工序持续时间按照仿真模型中的描述表示，根据以往的保障数据分析，各专业可能发现飞机故障的概率为（按照机械、军械、特设、航电的专业顺序）：

$$P_{GX_i^j} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.024 & 0.005 & 0.011 & 0.007 \\ 0 & 0.008 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.019 & 0.020 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \times & \times \\ 0 & \times & \times & \times \\ 0 & \times & \times & \times \end{bmatrix}$$

3) 参数输入。

按照仿真模型，将仿真次数设定为 2 000 次。执行任务飞机数量为 14 架，备份飞机数量分别为 2 架、3 架、1 架；主要的保障车辆：牵引车、冷气车、加油车、附油车、电源车、氧气车、挂弹车及空调车数量分析如下。

4 仿真结果分析

1) 装备保障方案总体评估。

经过对 3 套装备保障方案每套仿真 2 000 次后，得到如图 2 所示的机务准备时间与及时完成任务概率的关系。从此结果可以看出：按照方案 1 和方案 2 保障全部 14 架参战飞机的机务准备时间为 110 min，方案 3 的机务准备时间为 148 min。假设机务人员任务前 2.5 h 进场，即机务准备时限为 2.5 h，按照 3 套装备保障方案实施装备保障，均可以完成机务保障任务，但按照方案 3 实施保障，冗余时间较少，往往缺少足够时间处置实际装备保障工作的突发情况。

2) 保障车辆配置评估。

3 套装备保障方案的保障车辆配置数量不同的情况下，根据图 2 可以看出：方案 1 和方案 2 的结果几乎相近，方案 3 的机务准备时间与前两套方案相差较大，而方案 2 的各型保障车辆均较方案 1 配置的多，方案 1 的各型保障车辆配置数量比方案 3 的多，这说明方案 1 中保障车辆的满足率和利用率均较高，更符合机务保障任务的需求。而方案 2 中保障车辆的满足率较高、利用率较低，配置数量过剩，并且保障车辆配置过多对机务准备时间的影响不大；方案 3 中保障车辆的利用率较高、满足率较低，配置数量偏少。

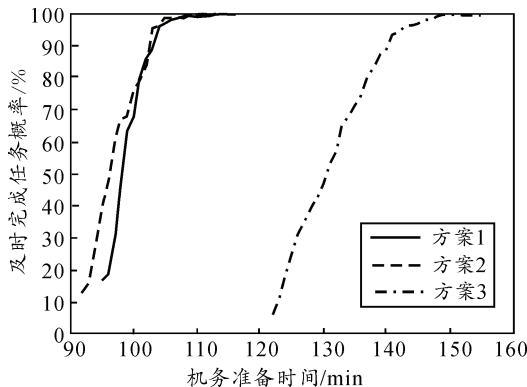


图 2 3 套装备保障方案机务准备时间与及时完成任务概率关系

如图 3~图 6 所示：通过对该模型的仿真还可以查看其中某次仿真过程中 1 架飞机各专业的具体工作进度情况。从此仿真图可见：由于牵引车的配

置数量问题，造成整机等待 10 余分钟。通过此图可判断具体每种类型的保障车辆配置是否合理，以进一步优化其配置。

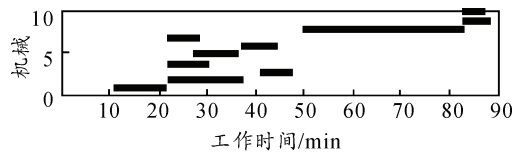


图 3 某此仿真过程中 1 架飞机机械专业工作进度

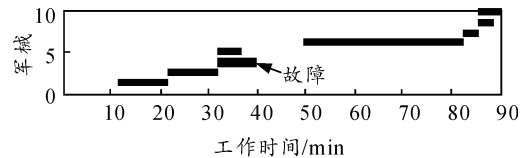


图 4 某此仿真过程中 1 架飞机军械专业工作进度

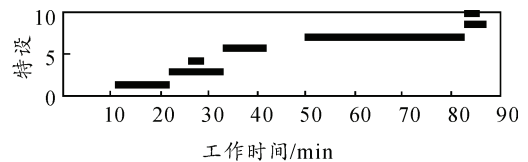


图 5 某此仿真过程中 1 架飞机特设专业工作进度

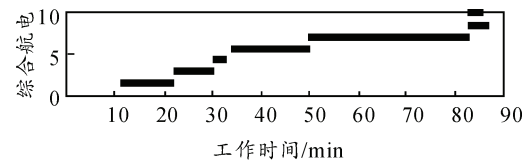


图 6 某此仿真过程中 1 架飞机综合航电专业工作进度

此图中显示，某架飞机军械专业在直接机务准备时挂弹前通电工序发现故障，此时，应及时更换备份飞机执行作战任务。

3) 保障人员编配和保障流程评估。

3 套装备保障方案的保障人员编配数量和保障流程相同，方案 3 在保障流程优化不足的情况下，直接影响到其能否及时完成装备保障任务。如果适当增加机械专业保障人员，方案 1 和方案 2 可进一步缩短机务准备时间，以弥补保障流程优化不足的情况；反之，若保障人员编配不足，则可通过优化保障流程来弥补。基于以上 4 个方面的分析，建议采用方案 1。

5 结论

通过采用蒙特卡罗方法模拟仿真任务实施阶段的机务保障流程，对装备保障方案进行量化的评估分析，仿真结果能够明确显示各套装备保障方案的优劣，可以有效解决部队当前仅仅依靠保障经验对装备保障方案进行评估的问题。

参考文献：

[1] 曲丽丽, 康锐, 肖波平. 基于 SFA 的研制阶段装备保障方案评价模型[J]. 航空学报, 2010, 31(3): 526-531.

[2] 彭涛, 阮拥军, 董立宁. 基于要素的装备维修保障方案评估方法研究[J]. 价值工程, 2012(26): 308-309.

[3] 姜晨, 赵喜春, 殷志祥. 基于 EPC 的保障方案权衡建模仿真[J]. 弹箭与制导学报, 2007, 27(2): 320-324.

[4] 绳慧, 张柳, 李季颖, 等. 基于 IDEF 的使用阶段装备保障方案评价模型[J]. 指挥控制与仿真, 2011, 33(4): 42-46.

[5] 李震, 阮拥军. 基于 UML 的装备保障方案建模方法研

究[J]. 价值工程, 2011(27): 14-15.

[6] 高飞, 陈辉强, 魏鑫, 等. 基于本体的装备保障方案规范化研究[J]. 科技广场, 2009(11): 14-17.

[7] Jones JV. Integrated Logistics Support Handbook(3rd Ed)[M]. Sole Logistics Press, 2006: 155-218.

[8] Headquarters Department of the Army. Integrated logistics support[R]. AR700-127, 2005.

[9] 杜比 A. 蒙特卡罗方法在系统工程中的应用[M]. 卫军胡, 译. 西安: 西安交通大学出版社, 2007: 127-133.

[10] Metropolis N, Ulam S. The monte carlo method[Z]. J. Am. stat. Ass., 1949.

(上接第 22 页)

$$Z = \begin{pmatrix} 0.0210 & 0.2478 & 0.2304 & 0.0548 \\ 0.0236 & 0.1377 & 0.1383 & 0.0648 \\ 0.0189 & 0.1927 & 0.3227 & 0.0448 \\ 0.0231 & 0.1377 & 0.2304 & 0.0498 \end{pmatrix}.$$

理想点的确定是由式 (8)、式 (9) 决定的, 得到的理想点和负理想点, 分别为:

$$A^* = [0.0236, 0.2478, 0.3227, 0.0448];$$

$$A^- = [0.0189, 0.1377, 0.1383, 0.0648].$$

由式 (10) 计算被评价方案与理想点和负理想点的欧几里得距离, 得到:

$$S_1^* = 0.0929, S_2^* = 0.2157, S_3^* = 0.0553, S_4^* = 0.1438;$$

$$S_1^- = 0.1439, S_2^- = 0.0047, S_3^- = 0.1935, S_4^- = 0.0934.$$

由式 (11) 计算各个装备体系方案与理想点的相对逼近程度 C_j 为:

$$C_1 = 0.6077, C_2 = 0.0213, C_3 = 0.7777, C_4 = 0.3938.$$

依据其数值, 可得装备体系方案排序:

$$A_3 \succ A_1 \succ A_4 \succ A_2.$$

4 结束语

为解决武器装备体系方案优选问题, 笔者通过熵值赋权法最大限度地发挥了评价指标本身包含的信息量, 充分减少了人为因素的影响, 使评估与优选更加客观、科学、有效。通过实例应用可知: 基于熵值赋权的 TOPSIS 方法计算过程简单易行, 可以通过计算机编程实现, 且可信度较高, 具有较高的实用价值。

参考文献：

[1] 毛昭军, 蔡业泉, 李云芝. 武器装备体系优化方法研究[J]. 装备指挥技术学院学报, 2007, 4(2): 9-13.

[2] 李仁传, 张合勇, 殷燕. 对武器装备体系结构优化几个基本问题的理性认识[J]. 军事运筹与系统工程, 2011, 22(5): 5-10.

[3] 程静, 张明昉. 装备体系评价指标系统研究[J]. 通用装备保障, 2010(8): 15-16.

[4] 王中杰, 李侠, 万山虎. 雷达预警探测系统装备体系结构优化[J]. 装甲兵工程学院学报, 2008, 22(5): 1-5.

[5] 林齐宁. 决策分析[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2003: 105-113.