doi: 10.7690/bgzdh.2026.03.001

面向战备完好性的航母航空保障系统维修策略优化模型

朱兴动[1]，由洪鹏[2]，范加利[2]
（1. 海军航空大学，山东 烟台 264000；2. 海军航空大学青岛校区，山东 青岛 266041）

摘要：针对航母航空保障系统任务间隔期的维修任务存在时间和小组数量有限的限制，建立一种对维修策略优化的仿真优化模型。基于遗传算法将维修任务最优分配给有限的维修人员，从而压缩解空间；通过蒙特卡洛(Monte Carlo，MC)仿真方法评估不同维修方案的系统可用度，确定可用度最高的维修方案。通过实例验证该模型的有效性，并分析维修小组技能熟练度对系统可用性的影响。实验结果表明：该模型对保障系统维修能力有显著的提升。

关键词：航母航空保障系统；维修策略；遗传算法；MC 仿真
中图分类号：TJ83　　**文献标志码**：A

Maintenance Strategy Optimization Model of Aircraft Carrier Aviation Support System for Operational Readiness

Zhu Xingdong[1], You Hongpeng[2], Fan Jiali[2]
(1. *Naval Aviation University*, *Yantai* 264000, *China*;
2. *Qingdao Campus of Naval Aviation University*, *Qingdao* 264041, *China*)

Abstract: According to the characteristics of limited maintenance time and number of maintenance teams in the maintenance task of aircraft carrier aviation support system in the task interval, a simulation optimization model for optimizing maintenance strategy is established. Based on genetic algorithm, the maintenance task is optimally assigned to the limited maintenance personnel, so as to compress the solution space. The system availability under different maintenance schemes is evaluated by Monte Carlo (MC) simulation method, and the maintenance scheme with the highest availability is determined. The effectiveness of the model is verified by an example, and the influence of the skill proficiency of the maintenance team on the system availability is analyzed. The experimental results show that the model can significantly improve the maintenance capability of the support system.

Keywords: aircraft carrier aviation support system; maintenance strategy; genetic algorithm; MC simulation

0　引言

海上任务期间，舰载机需具备持续作战能力，要求舰载机本身保持较高的战备完好率的同时，航母航空保障系统持续有效的可用状态是必不可少的。高强度、高频率的保障任务，对航空保障系统战备完好性造成极大的挑战。对于任务过程中出现的设备故障，必须在适当的时间进行检测和维护。显而易见，对系统的运行状态进行维修活动是不可行的，可选择在 2 个连续任务之间的任务间隙开展维修活动，装备在实际使用过程中也是如此。一般情况下，任务间隙对于故障的检测和维修时间十分紧张，主要通过更换故障件来排除故障。同时，维修活动受到了维修时间、备件供给延迟、维修人员数量和能力素质等因素的限制，并不是所有故障部件都能更换修复。对于复杂系统来说，维修更换部件的不同对于系统战备完好性有着十分显著的影响。

针对维修策略国内外学者进行了大量的研究。Liu 等[1]提出了一种多态系统维修策略优化模型；Pandey 等[2]以维修费用和任务间隙为约束，建立了以系统可靠度为目标函数的维修策略优化模型；王少华等[3]以任务间隙为约束，系统可靠性最大化为目标，以最小维修、不完全维修和换件维修为策略，建立了维修策略优化模型。Dao 等[4]提出了一种以任务间隙和系统可靠度为约束，系统利润最大化为目标函数的维修策略优化模型；王海朋等[5]考虑不修、最小维修、换件维修和多中间维修水平，提出了以可靠性最大化为目标的一种基于粒子群优化(PSO)算法和多员维修的复杂系统维修策略优化模型。从上述文献中可以看出，维修策略优化问题在过去的几十年里得到了广泛的研究。大多数维修策略研究的目标是系统可靠性，而不是系统可用性。维修工作为一个重要的约束并没有被考虑。

笔者提出一种对航母航空保障系统维修方案进

收稿日期：2024-11-06；**修回日期**：2024-12-06
第一作者：朱兴动(1967—)，男，黑龙江人，博士。

行选择的仿真优化方法，针对已知出现的系统故障问题，以系统使用可用度为最大化目标，在有限的维修时间和维修小组的情况下，选择最优的维修方案：首先，通过对航母航空保障系统结构框架和任务间隙的备件更换维修保障流程的深入分析，建立合乎要求的维修策略优化模型；其次，提出基于遗传算法-蒙特卡洛仿真的优化方法，采用遗传算法将维修任务最优分配给有限的维修人员，通过蒙特卡洛(MC)仿真方法评估不同维修方案的系统可用性，确定可用度最高的维修方案；最后，通过此仿真优化模型对航母航空保障系统的维修策略进行优化计算，并研究维修人员和任务持续时间对系统可用性的影响。

1 系统维修策略优化问题描述

1.1 系统结构及维修模式

航母海上任务期间作战部署有其自身的特点和规律，相对于其他海上作战平台，航母作战部署更加强调计划性，重视统筹规划。舰载机出动回收保障任务一般都是围绕舰载机作战训练任务来开展。为有效管理飞行任务，舰载机出动保障任务一般是以飞行日来筹划。以美海军为例，根据当日编队作战任务情况，一般取值 12、18 或 24 h[6]。无论飞行多长时间，舰载机出动回收并不是一个长期不间断的工作状态。一般情况下，要在任务间隙完成对航空保障系统的故障监测及维护保养，确保航空保障系统战备完好性。

如图 1 所示，系统由 4 个独立子系统串联组成，系统在飞行日期间出现故障后，在任务间隙进行故障部件的监测和备件的更换。每个子系统包含独立的部件，相互连接。设每个部件用(i, j)表示，i 表示子系统，j 表示子系统中部件。

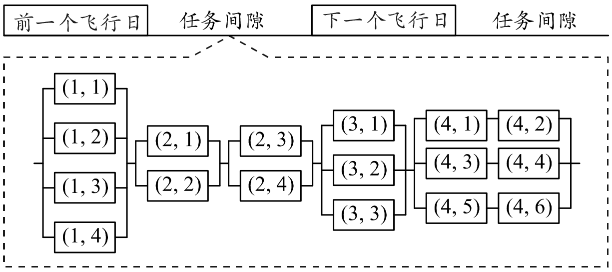

图 1 系统结构

任务间隙是故障部件检测、更换维修的最佳时机，但是由于维修时间和人员有限，只能对故障部件进行选择性更换维修。例如，当一个飞行日结束之后，系统中(1, 1)、(1, 2)、(2, 1)、(2, 3)、(3, 1)、(4, 1)等设备发生故障，在现有的维修间隙内和有限数量的维修人员情况下，对上述的设备进行换件维修，笔者主要研究的内容是优化分配有限的维修时间和维修任务，以最大限度提高系统在下次任务中的使用可用度。

1.2 模型假设

为了使建立的模型更具针对性，做出如下假设：

1) 系统、子系统和部件只有 2 种状态，即运行状态和故障失效状态。部件寿命服从指数分布，因此，只考虑备件更换的维修模式来恢复故障部件。

2) 所有维修人员具有相同的维修能力，即针对同样的维修任务，维修时间不会因为维修人员的不同而有差异。

3) 已知各设备部件更换时间。

1.3 重要参数定义及符号说明

为了方便模型描述，给出文中变量符号及相应下标定义：S 为子系统编号；n_i 为子系统 i 的组件编号；λ_{ij} 为子系统 i 中部件 j 的故障率；$t_{r_{ij}}$ 为子系统 i 中部件 j 的修复时间；$t_{f_{ij}}$ 为任务期间子系统 i 中部件 j 的故障时间；c 为指示维修小组；q 为可用维修小组数量；q^*为维修小组正在工作的组数；V_{ij} 为组件(i, j)是否修复变量，$V=\begin{cases}0 & 部件(i, j)未被修复\\ 1 & 部件(i, j)被修复\end{cases}$；$L$ 为维修方案，$L=\{V_{ij}\}$；ω 为任务数量，$\omega=\sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{n_i}V_{ij}$；$\tau$ 为维护任务指标 τ=1，…，ω；t_τ 为维护任务 τ 的时间变量；t_L 为维修方案 L 的总维修时间；$t_L=\sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{n_i}t_{r_{ij}}V_{ij}$；$h_{c\tau}$ 为任务 τ 是否分配给维修小组 c 的状态变量：$h_{ct}=\begin{cases}0 & 任务未分配给维修小组c\\ 1 & 任务被分配给维修小组c\end{cases}$；$c_\tau$ 为编号索引指示任务 τ 被分配给的维修小组；$H=\{H_{c\tau}\}$为维护任务分配方案；t_b 为任务间歇；t_d 为任务持续时间；Y_{ij} 为子系统 i 中部件 j 在上次任务完成后（即维修前）的状态变量，$Y_{ij}=\begin{cases}0 & 部件(i, j)在修复前失效\\ 1 & 部件(i, j)在修复前正在运行\end{cases}$。$X_{ij}$ 为子系统 i 中部件 j 在执行任务时的状态变量，$X_{ij}=\begin{cases}0 & 部件(i, j)在任务期间失效\\ 1 & 部件(i, j)在任务期间运行\end{cases}$；$f_{ij}$ 为子系统 i 中部件 j 的故障密度函数；$\phi(x_{ij})$为系统结构功能，$\phi(x_{ij})=$

$\begin{cases} 0 & \text{系统出现故障} \\ 1 & \text{系统运行正常} \end{cases}$；$st$ 为模拟次数；$A(i)$为第 i 次仿真的系统的可用性；u 为任务期间的不可用时间；A 为系统可用性。

2　面向系统战备完好性的维修策略优化分析

2.1　维修策略优化问题的数学描述

在有限的维修时间和维修小组的情况下，选择保证在下次任务中系统可用性最大的最优维修方案和任务分配方案，因此，模型可以定义为：

$$\left.\begin{array}{ll} \max & A \\ \text{s.t.} & t_L \leqslant t_b \\ & q* \leqslant q \end{array}\right\}。\tag{1}$$

2.2　系统维修策略优化总体程序设计

当系统结束上个飞行日任务，进入任务间隙即维修阶段时，一般的维修过程包括检测系统状况，列出所有可行维修方案，评估和选择维修方案 3 阶段。在此基础上，在维修时间和维修人员的约束下，面向系统战备完好性的维修策略优化程序如图 2 所示。

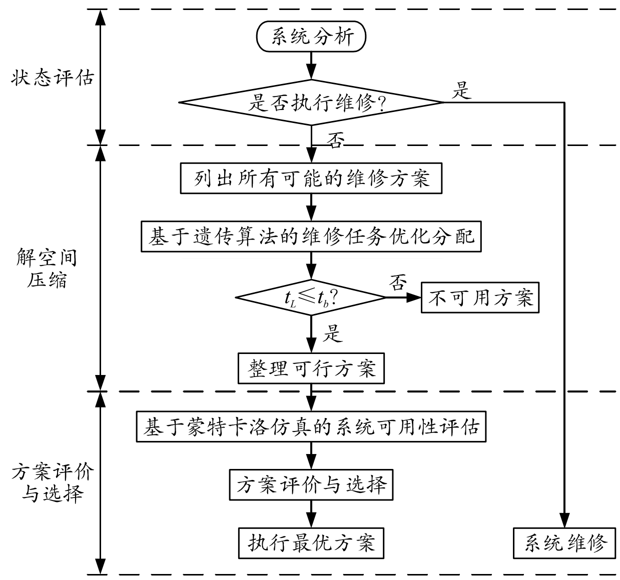

图 2　系统维修策略优化程序

步骤 1：状态评估。检查系统状态，找出需要修复的故障。此外，还必须考虑维修和支持条件(包括可用的维修设施、备件等)和任务请求(包括有限的任务间歇、任务目标等)，以决定是否有必要进行维修活动。例如，如果将故障系统恢复到正常运行状态的最短时间是 12.5 h。而允许的任务休息时间(即可用的维修时间)只有 12 h。在这种情况下，系统无法按计划执行下个飞行日作战计划，需要向上级请示，进行系统维修，笔者对此类情况暂不做研究。

步骤 2：解空间压缩。根据系统状况，列出所有可能的维修方案。然而，方案可能由于一些限制条件而不可行。笔者以维修人员和维修时间的限制，采用遗传算法对维修任务进行优化分配，使维修总时间最小。维护时间大于限制时间的方案被放弃。从而得到可行方案，进一步缩小解空间。

步骤 3：方案评价和选择。采用蒙特卡罗模拟法对系统在各种可行维修方案后的下一个飞行日的可用性进行评估，从而选择最优维修方案并开展维修活动。

3　基于遗传算法的维修任务优化分配模型

3.1　遗传算法

遗传算法是 19 世纪 60 年代末，由美国学者 JohnHolland 受物种进化理论的启发提出来的智能优化算法，经过几十年的理论研究和发展，已经成为了应用最为广泛，最为成功的智能算法之一。遗传算法主要采用选择、交叉、变异等遗传算子进行全局搜索[7]。

遗传算法是根据问题的目标函数构造一个适值函数，对一个有多个解构成的种群进行评估、运算、选择，经过多代繁殖，获得适应值最好的个体作为问题的最优解。具体描述如下：

1) 产生一个初始种群。

遗传算法是一种基于群体寻优的方法，算法运行时是以一个种群在搜索空间进行搜索。一般采用随机方法产生一个初始种群。

2) 根据问题的目标函数构造适值函数。

在遗传算法中，使用适值函数来表征种群中个体对其生存环境的适应能力，每个个体具有一个使用值。适应值是群体中个体生存机会的唯一确定性指标，适值函数的形式直接决定群体的进化行为，适值函数基本上依据优化的目标函数来确定。为了能够直接将适值函数与群体中的个体优劣相联系，在遗传算法中，适应值规定为非负，并且在任何情况下总是希望越大越好。

3) 根据适应值好坏不断选择和繁殖。

在遗传算法中自然选择的体现就是以适应值的大小决定的概率分布来进行选择。

4) 若干代后得到的适应值最好的个体多对应的解即为问题的最优解。

具体的遗传算法过程如图 3 所示。

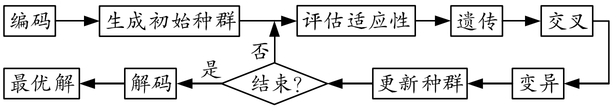

图 3 遗传算法过程

3.2 建模分析

当给定维修方案时，就可以知道方案中需要维修更换的故障部件及其相应的维修时间，总的维修时间也由维修小组的数量决定。当维修小组数量不小于所选部件数量时，所有维修任务可同时进行，总维修时间为最大维修任务的时间。当只有一个维修小组时，所有的维修任务将由同一个维修小组执行，总维修时间为所有维修任务时间的总和。

给定维修方案的总维修时间可以表示为：

$$t_L=\begin{cases}\sum_{\tau=1}^{\omega}t_\tau=\sum_{i=1}^{S}\sum_{j=1}^{\eta_i}t_{ij} & q=1\\ \max\left(\sum_{\tau=1}^{\omega}t_\tau h_{c_\tau}\right) & q>1,h_{c_\tau}=0,1\end{cases}。\tag{2}$$

式中 $\sum_{\tau=1}^{\omega}t_\tau h_{c_\tau}$ 为分配给维修小组 c 维修任务的总时间。

假设，维修方案 L 中包含 ω 个维修任务，可用维修小组数量为 q，采用遗传算法得到该维修方案的最优时间。开始随机初始化一个 NP 染色体群体。每个染色体(如图 4 所示)对应一个任务分配方案。

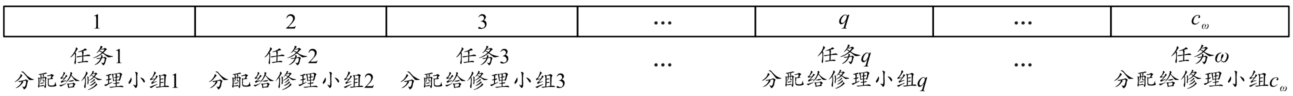

图 4 染色体编码

由于染色体的每个基因代表一个维修小组，随机生成一个范围在 1 到 q 的基因序列，然后评估其适应度函数，即总维护时间。选择一对个体作为父母，通过对亲本染色体的交叉和突变，可以产生新的染色体。这个过程一直进行迭代，直到找到一个染色体具有令人满意的适应值，或者直到达到迭代次数的上限。

4 基于 MC 仿真的系统可用性评估模型

4.1 MC 仿真方法

MC 方法也称为统计试验方法或随机模拟方法，是根据待求随机问题的变化规律、物理现象本身的统计规律，人为构造一个合适的概率模型，依照该模型进行大量的统计试验，使它的某些统计量正好是待求问题的解。MC 方法可以用于解决各类问题。根据是否涉及随机过程的性态和结果，分为：1) 确定性数学问题，如计算多重积分、求解逆矩阵和求解积分方程等；2) 随机性问题，解决这类问题一般采用直接模拟法，即根据实际物理情况的概率法则，用计算机进行抽样试验，具体问题包括运筹学的库存问题、复杂系统的可靠性分析问题和随机服务系统的排队问题等。

分析备件维修保障系统时，当系统包括较多设备或维修系统很难用数学解析模型描述时，需要用数字仿真方法。装备的零部件的寿命大小，受到设计寿命、失效机理、工作环境等多种因素的影响，故零部件的寿命分布是随机事件。而 MC 方法主要应用于随机事件的仿真，并且有很好的仿真效果。在备件维修保障系统分析中，主要是利用该方法模拟系统寿命过程以及各项维修工作，在此基础上分析系统的故障维修费用率、可用度等指标[8]。

4.2 仿真流程设计

在系统执行一个维修方案维护之后，获得一个新的系统状态，此时系统被要求按计划执行舰载机保障任务。在执行任务期间，系统在该状态下，可能因设备故障如设备 1 在 t_1、t_4 时刻出现故障)引起系统故障，导致系统不可用，必须立即对这些部件进行维修，使系统恢复到正常运行状态。在维修期间(t_1～t_2、t_4～t_5 时)，系统不可用。如果部件的故障不引起系统故障(如设备 2 在 t_3 时刻的故障)，失效的部件将不需要被修复，保持故障状态直到任务结束。

具体仿真流程如下：

步骤 1 初始化数据。输入维修方案 L，设备状态 $Y=\{Y_{ij}\}$，失效密度函数 $f=\{f_{ij}\}$，修复时间 $t=\{t_{rij}\}$，任务持续时间 t_d，模拟次数极限 st，变量 m 表示当前仿真次数 m=0，变量表示修复次数 r=0。

步骤 2 根据维修方案 L 和设备 Y 更新设备状态 X。

步骤 3 根据蒙特卡罗模拟得到各部件的失效时间，用 $t_f=\{t_{fij}\}$ 表示。

步骤 4 如果 $\min(t_f)>t_d$ 并且 $r=0$，则 $A(i)=1$，执行步骤 8，否则执行步骤 5。

步骤 5 如果 $t_d\geqslant\min(t_f)>0$，求 $\min(t_f)$对应的分量$[(x, y)]$。通过令 $X_{xy}=0$ 更新系统状态 X。通过 $\phi(X)$ 判断系统状态，如果其中的 $\phi(X)=0$，则执行步骤 6，

否则令 $t_{fxy}=0$，执行步骤 7。

步骤 6　修复故障部件，$u=u+t_{rxy}$。通过 $t_{fij}=t_{fij}+t_{rij}$ 更新其他设备的故障时间，通过 $r=r+1$ 更新修复次数。随机生成已修复元件(x, y)的失效时间，并通过设置 $X_{xy}=1$ 更新设备状态 X。

步骤 7　如果 $0<\min(t_f)<t_d$，执行步骤 5。如果 $\min(t_f)>t_d$，计算系统可用度 $A(i)=(t_d-u)/t_d$，$m=m+1$，$r=0$。

步骤 8　如果 $m<s_t$，执行步骤 3，否则计算系统可用度 $A=(A(1)+A(2)+\cdots+A(i)+\cdots A(s_t))/s_t$。

步骤 9　基于从步骤 1 到步骤 8 的仿真过程，得到了不同维修方案 L 下的系统可用度，选择系统可用度最大的最优方案。

5　实例验证

根据上述的定义，选取一个飞行日后的系统状态来进行验证。设定一个飞行日任务时间为 t_d=12 h，飞行日任务间隙时间为 t_b=12 h，有 3 个维修小组负责航空保障系统故障件的更换维修工作。其中，上一个飞行日任务结束后，系统具体状态如图 5 所示，设备参数如表 1 所示。

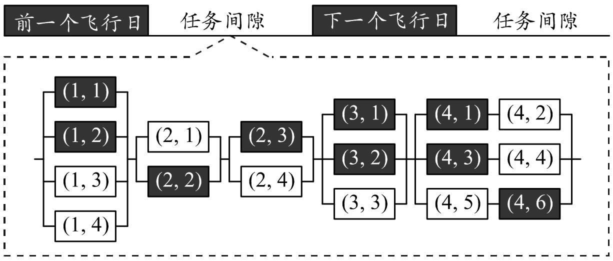

图 5　系统状态

表 1　系统设备参数

设备编号	任务后状态	修复时间/h	故障率 λ
(1, 1)	0	5.0	0.020
(1, 2)	0	5.0	0.020
(1, 3)	1	5.0	0.020
(1, 4)	1	5.0	0.020
(2, 1)	1	4.0	0.022
(2, 2)	0	4.0	0.022
(2, 3)	1	3.5	0.025
(2, 4)	0	3.5	0.025
(3, 1)	0	4.0	0.040
(3, 2)	1	4.0	0.040
(3, 3)	0	4.0	0.040
(4, 1)	0	3.0	0.035
(4, 2)	1	5.0	0.030
(4, 3)	0	3.0	0.035
(4, 4)	1	5.0	0.030
(4, 5)	1	3.0	0.035
(4, 6)	0	5.0	0.030

5.1　系统状态评估

根据图 6 可得系统任务后的状态为 Y=[0 0 1 1 1 0 0 1 0 0 1 0 1 0 1 1 0]，共有 9 个故障部件，分别属于 4 个子系统。此外，除了子系统 4 之外，每个子系统中的组件都是独立且相同的。对于子系统 1，有 3 种可能的维修方案，即不修理任何部件、修理一个部件和修理 2 个部件。子系统 2、3 和 4 的可能维修方案分别为 4、3 和 6，所以，可能实施的维修方案数量为 3×4×3×6=216。解空间可进一步缩小：系统结构(4, 1)、(4, 3)、(4, 6) 3 个部件中至少有一个必须维修，才能保证系统的功能实现，对应维护方案 $V_{4,1}=0$、$V_{4,3}=0$ 且 $V_{4,6}=0$ 应该被去掉，因此，维修方案数减少到 180。

5.2　解空间压缩

当 3 个维修小组同时维修时，将上述参数代入模型中。进行基因编码，随机生成取值为 1～3，长度为 9 的染色体。种群大小设定为 20，交叉概率 p_c=0.3，变异概率 p_m=0.01，迭代次数为 80。计算 180 种维修方案在有 3 个维修小组的情况下的总维修时间 t_L。如果 $t_L>t_b$，则维修方案被淘汰。经过计算，解空间压缩为 163 个可行方案，总维修时间如图 6 所示。

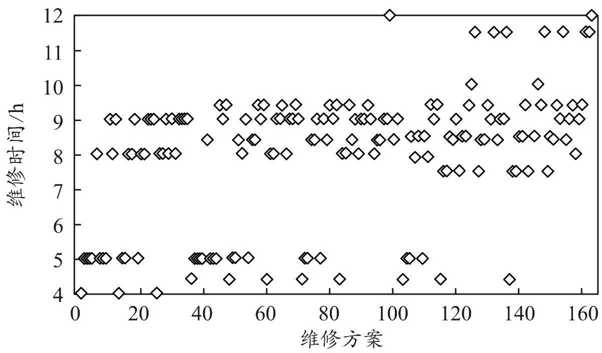

图 6　163 种可行方案维修时间

5.3　可用度评估及维修方案选择

分别对 163 个可行方案利用蒙特卡洛方法进行系统可用度评估，评估结果如图 7 所示。

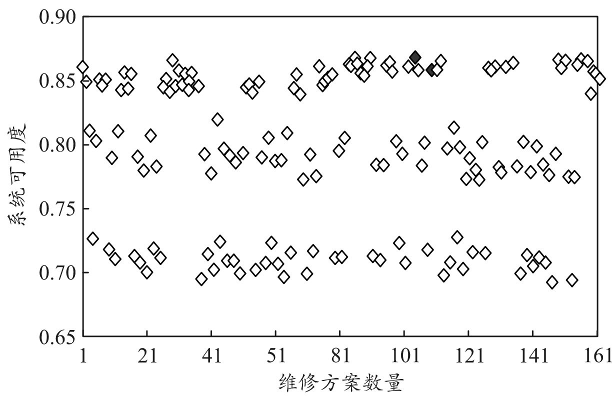

图 7　163 种可行方案的系统可用度评估

可以看出：选择该维修方案可以保证系统维修

后可用性最高为 0.868，总维护时间为 10 h。最佳维修方案如表 2 所示。

表 2 最佳维修方案

设备编号	任务后状态 *Y*	维修方案	维修后状态 *X*	维修用时/h	总维修用时/h	维修后系统可用度
(1, 1)	0	1	1	5		
(1, 2)	0	1	1	5		
(1, 3)	1	/	1	/		
(1, 4)	1	/	1	/		
(2, 1)	0	1	1	4		
(2, 2)	0	1	1	4		
(2, 3)	1	/	1	/		
(2, 4)	0	0	0	/		
(3, 1)	0	0	0	/	10	0.868
(3, 2)	1	/	1	4		
(3, 3)	0	0	0	/		
(4, 1)	0	0	0	/		
(4, 2)	1	/	1	/		
(4, 3)	0	0	0	/		
(4, 4)	1	/	1	/		
(4, 5)	1	/	1	/		
(4, 6)	0	1	1	4		

5.4 维修小组对系统可用性的影响

维修小组是维修效率和系统可用度的重要影响因素。如果有足够数量的维修小组，所有的维修任务都可以同步执行，能极大地提升维修的效率。如果维修小组均具备较高的技能熟练度，也可以极大地提高维修的效率，从而提高系统的可用度。维修小组的数量受航母人员编制数量的限制；所以，此处笔者更关注维修小组的熟练度对于系统可用性的影响。这里可以用设备维修时长来度量维修小组的技能熟练度。1.5 *tr* 为低级熟练度，*tr* 为正常熟练度，0.8 *tr* 为高级熟练度(*tr*={5, 5, 5, 5, 4, 4, 3.5, 3.5, 4, 4, 4, 3, 5, 5, 3, 5})。可以看出：随着维修小组的熟练度的增加，维修时间相应地降低，修复后的系统可用性也随之提高，高级熟练度的维修小组可以接近 0.934。

表 3 维修小组技能熟练度与系统可用性关系

维修小组熟练度	维修时间/h	系统可用性
0.5*tr*	5.0	0.934
tr	10.0	0.868
1.5*tr*	11.5	0.804

通过上述分析也可看出：舰员级维修保障能力是航母航空保障系统在海上任务期间保持良好的战备完好性水平的重要因素，因此要加强舰员级维修能力的建设。

1) 在人员能力方面。要常抓不懈，注重训用一致，利用日常工作训练和院校培训时机，不断完善舰员级装备维修能力体系建设。开展层次化差异化培训，常态化组织专业骨干的专业维修技能培训和部分通用专业全面技能培训。

2) 在维修设备工具方面。要加大科研力度，立足设备维修现场具体环境和具体装备，开展专用维修工具研制，加强故障监测及定位设备的研发，提升舰员级维修的效率。

3) 在维修资料方面。要结合装备运维保障实际，注重运维数据积累，持续加强舰员级维修手册、交互式电子手册等配套建设。

6 结论

面向系统战备完好性，提出一种寻求最优的维修策略的模拟方法。在考虑维修小组数量有限的情况下，通过遗传算法对维修任务进行最优分配，使总维修时间最小，通过蒙特卡洛仿真，寻求最优维修方案，以最大限度提高系统的可用性，并通过实例验证了该方法的有效性。分析了维修小组的技能熟练度对系统可用性的影响，并结合实际需求，提出了提升舰员级维修能力建设的建议。

参考文献：

[1] LIU Y, HUANG H Z. Optimal selective maintenance strategy formulti-state systems under imperfect maintenance[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2010, 59(2): 356-367.

[2] PANDEY M, ZUO M J, MOGHADDASS R, et al. Selective maintenance for binary systems under imperfect repair[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2013, 113: 42-51.

[3] 王少华, 张仕新, 李勇, 等. 不完全维修条件下复杂系统的选择性维修决策方法研究[J]. 兵工学报, 2018, 39(6): 1215-1224.

[4] DAO C D, ZUO M J. Selective maintenance for multi-state series systems with s-dependent components[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2016, 65(2): 525-539.

[5] 王海朋, 段富海, 马骏. 复杂系统的选择性维修模型和求解算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(12): 2264-2273.

[6] 刘相春, 卢晶, 黄祥钊. 国外航母舰载机出动回收指标体系分析[J]. 中国舰船研究, 2011, 6(4): 1-7.

[7] 宿勇. 基于遗传算法和蒙特卡洛仿真的保障资源优化配置方法[J]. 指挥控制与仿真, 2015, 37(5): 99-103.

[8] CAO W, JIA X, HU Q. Selective maintenance for maximising system availability: A simulation approach[J]. Innovative Computing and Applications, 2017, 8(1): 12-20.