

doi: 10.7690/bgzd.2025.01.002

# 一种航母阻拦装置系统可用度评估方法

朱兴动<sup>1</sup>, 由洪鹏<sup>2</sup>, 范加利<sup>2</sup>

(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:** 系统可用度是航母阻拦装置系统战备完好性的重要度量指标, 提出一种航母阻拦装置系统可用度评估方法。利用层次分析法, 在系统维度构建可靠性框图, 在部件维度构建可修部件可用度与备件之间的马尔可夫状态转移过程, 并利用等价子模型计算部件可用度, 建立系统的可用度评估方法。验证结果表明, 该方法所得结果具备可行性和有效性。

**关键词:** 阻拦装置系统; 马尔可夫; 可用度; 可修备件

**中图分类号:** TJ83 **文献标志码:** A

## Availability Evaluation Method for Aircraft Carry Arresting Gear System

Zhu Xingdong<sup>1</sup>, You Hongpeng<sup>2</sup>, Fan Jiali<sup>2</sup>

(1. Naval Aviation University, Yantai 264000, China;

2. Qingdao Campus of Naval Aviation University, Qingdao 266041, China)

**Abstract:** System availability is an important index to measure the operational readiness of aircraft carrier arresting gear system, and an evaluation method for system availability of aircraft carrier arresting gear is proposed. By using the analytic hierarchy process, the reliability block diagram is constructed in the system dimension, and the Markov state transition process between repairable component availability and spare parts is constructed in the component dimension, and the equivalent sub-model is used to calculate the component availability, and the system availability evaluation method is established. The results show that the method is feasible and effective.

**Keywords:** arresting gear system; Markov; availability; repairable spare parts

## 0 引言

航母航空保障系统是用于保障舰载机起降的一系列特种装备及系统的统称。阻拦装置系统作为航母航空保障系统特种装备, 其战备完好性直接影响舰载机出动效率。使用可用度表征装备战备完好性的重要度量指标, 表征收到作战命令时具备作战条件的能力。航母作为大型的舰载机海上作战平台, 其装备系统具有常规舰艇所具备的随舰属性, 同时也具有独特的特点。尤其装备保障方面, 在自身的备件储备相对充足的同时, 还能对可修部件具备一定的维修能力。

当前研究中, 利用马尔可夫过程研究装备可用度时, 同时考虑备件库存影响和部件维修能力的并不多。文献[1]给出了基于马尔可夫理论的随舰装备系统的使用可用度算法, 只考虑不可修装备的可用度; 文献[2]在不考虑备件库存的条件下, 利用马尔可夫过程建模, 计算系统稳态可用度和瞬时可用度; 文献[3]给出了部件串联的可用度计算的表达式; 文献[4]研究了多个不相同的部件、带有优先权的串并

联可修系统, 通过马尔可夫过程计算系统的稳态可用度; 文献[5]针对多部件的可修装备群稳态可用度问题进行了研究。航母阻拦装置系统是由多台套同类型装备组成的串联系统, 在实际的装备使用和保障过程中, 系统中的同类型装备共用给定的备件资源。针对航母阻拦装置系统, 笔者考虑应用层次分析法。首先从系统维度, 利用非状态空间模型(可靠性框图等), 对系统进行分解分析; 利用马尔可夫状态转移过程, 从部件级别研究部件与备件之间的交互复杂, 从而评估系统的可用性。

## 1 系统可用度建模方法

### 1.1 层次分析法

阻拦装置系统等大型武器装备系统具有多层系统结构, 所属的分系统和设备部件具有数量较大, 结构复杂等特点。为建立系统可用性评估模型, 一般采用层次分析法对系统进行分析。假设分系统之间的统计独立, 通过分析系统层次化结构特点, 研究各层级指标之间的相关影响。

收稿日期: 2024-07-13; 修回日期: 2024-08-21

第一作者: 朱兴动(1967—), 男, 黑龙江人, 博士。

### 1.2 系统维度非状态空间建模

阻拦装置系统为同类型装备串联结构，可靠性框图如图 1 所示。

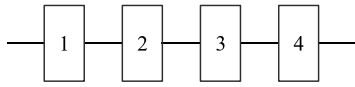


图 1 阻拦装置系统可靠性框图

根据文献[6]，串联系统使用可用度为：

$$A_0 = \prod_{i=1}^n A_i \quad (1)$$

### 1.3 分系统/设备维度马尔可夫过程

马尔可夫链是一类随机过程，由状态和状态转移组成。状态可跟踪系统状态，例如每种类型的运行资源数量、每种故障资源的恢复阶段、资源分配任务等。从任何状态到任何其他状态的转换都可以发生，可表示简单或复合事件。

马尔可夫链通常用于下层模型中。为方便理解，做如下定义： $R$  为从向上状态到向下状态的转换集合； $G$  为从向下状态到上升状态转换集合； $S$  为所有状态的集合； $U$  为向上状态的集合； $D$  为向下状态的集合； $S_i$  为状态  $i$ ； $t_{i,j}$  为从状态  $i$  到  $j$  的转换。如图 2 所示，整个子系统由具有这些参数的 2 状态设备替换。图形划分为向上和向下 2 类状态。从向上状态到向下状态的转换称为  $R$  转换；从向下状态到向上状态的转换称为  $G$  转换。

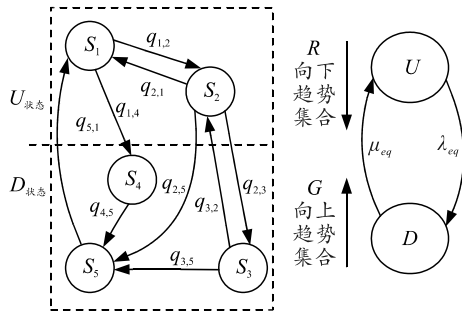


图 2 系统可用性马尔可夫过程示例

为将可用性 CTMC  $A$  转换为等效的 CTMC  $A_{eq}$ ，计算了  $\lambda_{eq}$  和  $\mu_{eq}$ 。基本思想是， $\lambda_{eq}$  等于“转换速率的所有  $R$  转换的总和乘以源状态的稳态概率”除以“所有  $U$  状态的稳态概率总和”。类似的定义应用于  $G$  转换，计算  $\mu_{eq}$ 。对于一个递归类的马尔可夫链，可以证明  $\sum_{t_{ij} \in R} \pi_i q_{ij} = \sum_{t_{ij} \in R} \pi_i q_{ij}$  [7]， $\pi_i$  是 CTMC 处于状态  $i$  的稳态概率。则  $\lambda_{eq}$  计算方程式：

$$\lambda_{eq} = \sum_{t_{ij} \in R} P(S_i | U) q_{ij} = \sum_{t_{ij} \in R} \pi_i q_{ij} / \pi_U \quad (2)$$

$$\pi_U = \sum_{S_k \in U} \pi_k \quad (3)$$

$\mu_{eq}$  计算方程式：

$$\mu_{eq} = \sum_{t_{ij} \in D} P(S_i | D) q_{ij} = \sum_{t_{ij} \in D} \pi_i q_{ij} / \pi_D \quad (4)$$

$$\pi_D = \sum_{S_k \in D} \pi_k \quad (5)$$

部件  $i$  的可用度  $A_{0i}$  计算公式为：

$$A_{0i} = \mu_{eqi} / (\lambda_{eqi} + \mu_{eqi}) = 1 / (1 + \lambda_{eqi} / \mu_{eqi}) \quad (6)$$

整理可得装置可用度  $A_{0e}$  计算公式：

$$A_{0e} = \frac{1}{\sum_{i=1}^I \frac{1}{A_{0i}} - (I-1)} \quad (1 \leq i \leq I) \quad (7)$$

## 2 阻拦装置系统可用度建模

### 2.1 系统保障过程描述及假定说明

航母阻拦装置一般布置同型阻拦装置 3~4 套，如美军福特级航母布置 3 套，而俄罗斯的库兹涅佐夫号航母布置 4 套。假设系统内同类型装备总数为  $N$ ，按图 1 的串联结构运行，且每台装备由  $I$  类关键可修部件串联组成，安装数为  $Z_i$ 。

当执行任务期间，系统中的装备相互独立开展相同内容的工作。部件  $i$  出现故障，导致整个系统停机，需更换备件。在海上任务期间，系统部件  $i$  的初始库存数为  $E_i$ 。部件不短缺时，直接使用备件更换故障部件；备件短缺时，则需要从备件库里将故障件维修好后，装备才能更换备件重新执行任务。为使模型的算法简化且可行，作如下假设：

- 1) 阻拦装置部件之间的失效相互独立，其失效不会发生在同一时刻；
- 2) 部件及备件均可修，且维修后功能完好；
- 3) 第  $i$  类部件的备件需求到达间隔时间服从参数为  $\lambda_i$  的指数分布，维修时间服从参数为  $\mu_i$  的指数分布；
- 4) 任务期间系统工作时间连续；
- 5) 保障资源充足，维修能力无限；
- 6) 部件在发现其不能工作之前总是完好的，即不能工作时间从故障发现时开始，部件发生故障，系统会立即停止工作；
- 7) 忽略故障件的更换时间。

### 2.2 阻拦装置系统马尔可夫转移过程

建立部件  $i$  的马尔可夫过程  $\{X_i(t)=G_i(t); t \geq 0\}$ ， $G_i(t)$  为工作过程中的部件  $i$  的库存量， $G_i$  最大值为

$E_i$ 。当  $G_i=0$  时，部件  $i$  发生故障，就会导致系统停机。状态转移如图 3 所示。包含  $S_i=E_i+2$  个状态， $S_i=\{0, 1, 2, \dots, E_i+1\}$ 。

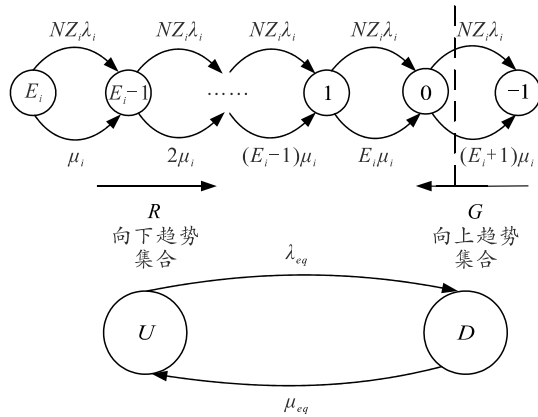


图 3 可修部件  $i$  状态转移

当部件  $i$  出现故障时，以转移率  $NZ_i\lambda_i$  从状态  $m$  转移到相邻状态  $m-1$ ，备件数量减少 1，系统仍然可用。当故障部件被修复后，回到备件库中，备件数量增加 1，从  $m-1$  状态转移到  $m$  状态，转移率为  $m\mu_i$ 。当  $G_i=0$  即  $m=E_i$  时，部件  $i$  备件库存消耗完，若再发生故障，系统停止工作。

### 2.3 确定转移概率矩阵

表 1 部件  $i$  的状态转移概率

状态	转移过程	转移率
备件正常 ( $U$ )( $0 \leq m \leq E_i$ )	$m \rightarrow m-1$	$NZ_i\lambda_i$
	$m-1 \rightarrow m$	$m\mu_i$
备件故障( $D$ )( $m=E_i+1$ )	$0 \rightarrow -1(G)$	$NZ_i\lambda_i$
	$-1 \rightarrow 0(R)$	$(E_i+1)\mu_i$

根据上表中部件  $i$  的状态转移概率，可将部件  $i$  的转移率矩阵记为  $P_i=[p_{mn}^i]$ 。其中  $m, n$  为部件  $i$  的状态编号， $0 \leq m, n \leq E_i+1$ 。当  $m \neq n$  时， $p_{mn}^i$  为从状态  $m$  到状态  $n$  的转移率；当  $m=n$  时， $p_{mn}^i$  为 1 减该行所有元素的和。

$$p_{mn}^i = \begin{cases} 1 - \sum_{l=0}^{E_i+1} p_{ml} & n=m, 0 \leq m \leq E_i+1 \\ NZ_i\lambda_i & n=m+1, 0 \leq m \leq E_i \\ m\mu_i & n=m-1, 0 < m \leq E_i+1 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

以俄罗斯某型航母阻拦装置系统为例。系统由 4 台同类型阻拦装置串联组成，假设每台装备由 4 类不同的关键部件串联组成，各部件之间相互独立，部件的平均故障间隔时间、故障部件的平均维修时间均服从指数分布，具体数值如表 2 所示。各类部件库存方案如表 3 所示，根据本文中评估模型计算

阻拦系统稳态可用度，计算结果如表 4 所示。

由图 4 可以看出：随着备件的增加，系统可用度在不断地提升，但变化率明显趋于下降，所以在随舰系统，可修备件的数量配备达到一定水平后，对于系统可用度提高的影响会越来越小。

表 2 部件信息

部件种类	平均故障间隔时间	平均维修时间	单装备部件安装件数
1	800	20	4
2	950	30	6
3	900	25	4
4	1 200	40	2

表 3 备件库存方案

方案	部件 1 件数	部件 2 件数	部件 3 件数	部件 4 件数
1	1	1	1	1
2	2	1	1	1
3	2	2	1	1
4	2	2	2	1
5	2	2	2	2
6	3	2	2	2
7	3	3	2	2
8	3	3	3	2
9	3	3	3	3
10	4	3	3	3
11	4	4	3	3
12	4	4	4	3
13	4	4	4	4

表 4 不同方案下的系统使用可用度计算结果

方案	计算结果	方案	计算结果
1	0.985 172	8	0.998 060
2	0.987 225	9	0.998 372
3	0.991 138	10	0.998 599
4	0.993 461	11	0.999 225
5	0.994 719	12	0.999 511
6	0.995 415	13	0.999 589
7	0.997 224		

为验证本模型的有效性，利用各部件实际使用的任务可靠度如表 5 所示，作为系统使用可用度基准进行验证。

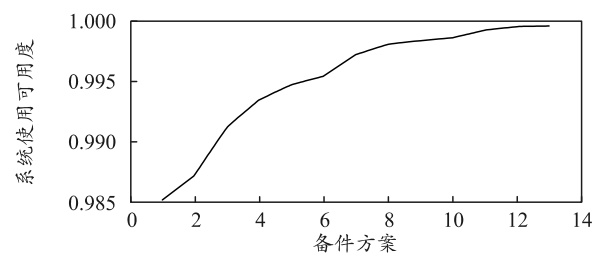


图 4 不同备件方案下的系统可用度曲线

由表 5 和 6 可看出：在各个库存方案下，模型计算的各部件可用度明显优于装备实际使用过程中统计的任务可靠度。部件在备件配备充足的情况下，任务期间可用度是明显提升的，符合正常预期，本文中模型所得结果可信有效。