

# 基于齐次马尔可夫链的装备完好率评价方法研究

赵领波<sup>1</sup>, 王亚彬<sup>1</sup>, 乔智勇<sup>2</sup>

<sup>1</sup>陆军工程大学石家庄校区, 河北 石家庄

<sup>2</sup>中部战区陆军某直属保障大队, 河北 石家庄

收稿日期: 2024年4月23日; 录用日期: 2024年5月22日; 发布日期: 2024年5月31日

## 摘要

装备完好率直接关系到部队遂行多样化作战任务的能力水平, 科学有效地开展装备完好率评价工作是加强装备管理的重要手段。在装备完好率评价过程中, 设定由技术指标、主要部件寿命储备、配套性、故障影响程度构成指标体系。本文采用马尔可夫链法和模糊综合评价方法分析对各指标进行计算, 运用层次分析法确定各指标的权重, 最后通过加权求和的方式确定装备完好率的总体情况, 从而增强装备完好率评价考核的全面性、科学性、精准性。

## 关键词

装备完好率, 齐次马尔可夫链, 评价, 层次分析法

# Research on Equipment Evaluation Methods Based on the Equipment of Homogeneous Malcov Chain

Lingbo Zhao<sup>1</sup>, Yabin Wang<sup>1</sup>, Zhiyong Qiao<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Shijiazhuang Campus, The Army Engineering University, Shijiazhuang Hebei

<sup>2</sup>A Guarantee Brigade Directly under the Army of the Central Theater, Shijiazhuang Hebei

Received: Apr. 23<sup>rd</sup>, 2024; accepted: May. 22<sup>nd</sup>, 2024; published: May. 31<sup>st</sup>, 2024

## Abstract

The equipment integrity rate is directly related to the ability level of the military to carry out di-

verified combat tasks. Scientific and effective evaluation of equipment integrity rate is an important means to strengthen equipment management. In the process of evaluating equipment integrity rate, an indicator system is established consisting of technical indicators, major component life reserves, compatibility, and degree of fault impact. This article uses Markov chain method and fuzzy comprehensive evaluation method to analyze and calculate various indicators, uses Analytic Hierarchy Process to determine the weight of each indicator, and finally determines the overall situation of equipment integrity rate through weighted sum, thereby enhancing the comprehensiveness, scientificity, and accuracy of equipment integrity rate evaluation and assessment.

## Keywords

Equipment Integrity Rate, Homogeneous Markov Chains, Evaluation, Analytic Hierarchy Process

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



## 1. 引言

装备完好率是衡量武器装备的技术状态和管理水平的重要参数，其质量优劣直接关系到部队遂行多样化作战任务的能力水平。装备完好率评价是根据军队装备管理相关法规，对装备配发、使用、保养、维修等全寿命全过程的客观评估。

当前，基层部队在组织装备完好率评定时，通常根据装备完好数与实力数的比例来评定，哪个单位装备完好率高就认为哪个单位装备管理水平好，该评价方法的优点是易于操作、便于比较，缺点是对装备使用动态变化情况和装备类型的基础差异考虑不够充分，评价结果难以真实反映基层单位装备管理的质量水平。本文采用齐次马尔可夫链的方法来对技术指标进行评定，利用层次分析法计算各指标所占权重，可以有效解决这一难题。

## 2. 装备完好率评价指标

为更加科学准确评估装备完好率，本文将装备完好情况划分为四个指标，即战技术性能、主要部件寿命储备、配套性、故障影响程度，如图1所示。

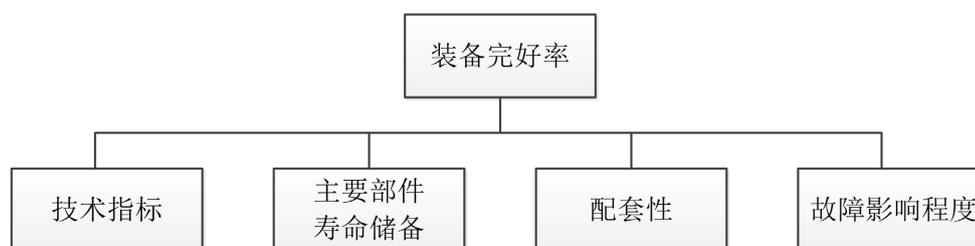


Figure 1. Evaluation index of equipment integrity rate

图1. 装备完好率评价指标

同时，为了更加准确细致的评价装备完好状态，本文对单件装备的完好情况划分等级：一级完好装备、二级完好装备、三级完好装备、四级完好装备、待修装备[1]。

### 3. 齐次马尔可夫链方法模型

马尔可夫链是指在随机过程中产生的一个具有马尔可夫性质的数列，该方法运用概率论中的随机数学模型，通过分析随机变量的现实变化情况来预测这些变量的未来变化情况[2]。

一个系统的某些因素在转移中，在第  $N$  次结果只受第  $N-1$  次结果影响，只与当前状态有关，而与其他因素无关，这种过程称为马尔可夫过程。马尔可夫链是指时间离散、状态也离散的马尔可夫过程。一个马尔可夫链，若在  $t$  时刻处于状态  $i$ ，而在  $t+u$  时刻处于状态  $j$ ，这两个时刻转移状态的概率与起始时间没有关系，则称之为齐次马尔可夫链，简称齐次马氏链。

从概率论中得知，随机的频率可等同于随机的概率，因此用频率代替以上的概率。这种时间上的随机评价和装备完好的随机状态符合齐次马尔可夫链在概率论中的一些性质。我们假设  $X_n$  用来描述装备完好率的第  $n$  次评价结果，这样可以得到一个齐次马氏链  $\{X_n, n \in N\}$ 。

在装备完好率的某个具体指标评价中，我们把一件装备完好情况的五种状态等级的装备台数分别占装备总台数的比例作为状态变量： $S(t) = [S_1(t), S_2(t), S_3(t), S_4(t), S_5(t)]$ 。

例如，第 1 次装备检查中，某连队 15 台装备中有 2 台为一级完好、4 台二级完好，5 台三级完好，2 台四级完好，2 台待修的分布，则状态变量就可写成： $S(1) = (2/15, 4/15, 5/15, 2/15, 2/15)$ 。

下一次检查中，我们要考察装备完好等级的转移情况。比如，第 1 次检查中，一级完好的台数为 2 台，转移到第 2 次检查中，保持一级完好的为 1 台，转移为二级完好的 1 台，其它的为 0 台，所以转移情况为  $(1/2, 1/2, 0, 0, 0)$ ；第 1 次检查二级完好的共 4 台，转移为一级完好的有 2 台，保持二级完好的有 1 台，下降为三级完好的有 1 台，其它的为 0 台，所以转移频率为  $(2/4, 1/4, 1/4, 0, 0)$ 。通过上述方法，我们可以分别计算出其他等级的转移情况  $(1/5, 2/5, 1/5, 1/5, 0)$ 、 $(0, 0, 1/2, 0, 1/2)$ 、 $(0, 0, 0, 1, 0)$ 。把以上的转移频率向量按行排成矩阵，就得到转移矩阵  $G$  列表，如表 1 所示。

Table 1. Transfer matrix G list

表 1. 转移矩阵 G 列表

1/2	1/2	0	0	0
2/4	1/4	1/4	0	0
1/5	2/5	1/5	1/5	0
0	0	1/2	0	1/2
0	0	0	1/1	0

从中可以看出，第 2 次检查装备状态向量  $S(2)$  与第 1 次检查装备状态向量  $S(1)$  之间有如下关系，即： $S(2) = S(1) \cdot G$ ，同理可推导出： $S(t+1) = S(t) \cdot G$ 。通过分析，齐次马氏链具有下列性质：装备当前的完好状态  $S(t+1)$  只与前一次检查过程中的完好状态  $S(t)$  有关，而与  $S(t)$  之前的任一次完好状态无关，两次不同时刻的装备完好状态转移频率与时间同样也无关[3]。

齐次马氏链  $\{X_n, n \in N\}$  在数学上有一个性质：当时间趋向于极限时，其状态会趋向于一个稳定值，即：当  $t \rightarrow \infty$  时， $S(t+1) = S(t) = S$ ，则  $S(t) = S(t) \cdot G$ ， $S \cdot (I - G) = 0$ 。其中  $I$  表示单位矩阵，令  $X = S = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$ ，方程化为： $X \cdot (I - G) = 0$ 。从而推导出所求的稳定状态[4] [5] [6]。

齐次马氏链分析法的主要步骤如下：

第一步，制定装备等级转移表。主要包括以下内容：所有装备的编号，某一装备在第 1 次、第 2 次检查中所处于的完好等级情况，该装备在两次检查中等级转移的情况。

第二步, 根据装备等级转移表, 确定转移矩阵  $G$ 。

$$G = \begin{bmatrix} g_{11} & \dots & g_{15} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ g_{51} & \dots & g_{55} \end{bmatrix}$$

其中:  $g_{ij} = \frac{ij \text{的台数}}{\text{首次检查中装备完好情况处于}i\text{等级的总台数}}$ ,  $ij$  表示该装备从  $i$  等级转向  $j$  等级。

第三步, 求解转移矩阵  $G$  的极限向量。

- ① 求出特征矩阵  $P = I - G^T$ , 其中  $I$  为单位矩阵;
- ② 列出特征方程  $X \cdot P = 0$ , 其中  $X = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$ ;
- ③ 解出向量  $X = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$ , 此向量即为  $G$  的极限向量。

#### 4. 装备完好率结合评定实例

本文选择两个不同类型的连队( $L_1, L_2$ )对其装备完好率进行评定。首先对影响装备完好率的四个指标进行分析, 通过分析可知装备战技术性能、主要部件寿命储备以及配套性均可采取齐次马尔可夫链进行计算, 而装备故障影响程度由于属于经验统计, 故在本文中引入多视角评判的方式进行统计概算。为确保评定装备完好率更加科学, 我们在上述基础上引入层次分析法, 为影响装备完好率的四个指标确定不同的权重, 最终加权计算出两个单位装备完好情况的得分排名。

(1) 运用齐次马尔可夫链计算装备战技术性能指标

为便于评定工作客观精准, 对装备状态等级进行赋分, 一级完好为 90 分以上、二级完好为 80~89 分、三级完好为 70~79 分、四级完好为 60~69 分、待修为 60 分以下。

首先, 根据检查情况列出装备质量转移情况表, 此表由两个连队的装备编号、第 1 次检查情况、第 2 次检查情况、两次检查的转移情况等四列组成。本文结合日常调研, 对不同类型装备的两个连队装备战技性能先后组织两次检查, 根据检查得分情况得到表 2 和表 3。

**Table 2.** Transfer table of equipment and technical performance of L1 company

**表 2.** L1 连队的装备战技术性能情况转移表

编号	第 1 次检查情况	第 2 次检查情况	ij 转移情况
1	92	82	12
2	75	83	32
3	83	91	21
4	76	75	33
5	88	84	22
6	74	80	32
7	85	80	22
8	67	70	43
9	56	64	54
10	84	80	22
11	84	80	22
12	72	68	34

续表

13	86	82	22
14	85	86	22
15	88	93	21

$\bar{X} = 79.67 \quad \bar{Y} = 79.86$

**Table 3.** Transfer table of equipment and technical performance of L2 company

**表 3.** L2 连队的装备战技术性能情况转移表

编号	第 1 次检查情况	第 2 次检查情况	ij 转移情况
1	82	90	21
2	85	72	23
3	90	84	12
4	78	88	32
5	87	82	22
6	89	93	21
7	59	65	54
8	62	70	43
9	69	75	43
10	78	66	34
11	76	85	32
12	75	68	34
13	78	74	33
14	95	94	11
15	88	95	21

$\bar{X} = 79.4 \quad \bar{Y} = 80.07$

然后，确定转移矩阵，分别用  $G(L_1)$  和  $G(L_2)$  记两个连队的转移矩阵。

$$G(L_1) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 2/8 & 6/8 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2/4 & 1/4 & 1/4 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$G(L_2) = \begin{bmatrix} 1/2 & 1/2 & 0 & 0 & 0 \\ 3/5 & 1/5 & 1/5 & 0 & 0 \\ 0 & 2/5 & 1/5 & 2/5 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

然后，求解特征向量

根据特征矩阵方程  $P = I - G^T$ ，并代入方程  $X \cdot P = 0$ ，即：

$$\begin{bmatrix} 1 & -2/8 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 2/8 & -2/4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3/4 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1/4 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ X_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

增加约束条件  $X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 = 1$ ，并解方程组：

$$\begin{cases} 8X_1 - 4X_2 = 0 \\ -8X_1 + 4X_2 - 4X_3 = 0 \\ 3X_3 - 4X_4 = 0 \\ -X_3 + 4X_4 - 4X_5 = 0 \\ X_5 = 0 \\ X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 = 1 \end{cases}$$

求解可得极限向量  $X(L_1) = (0.6667, 0.3333, 0, 0, 0)$ ，

同理，可求得极限向  $X(L_2) = (0.4235, 0.3529, 0.1765, 0.0471, 0)$

最后，根据设定的装备完好等级分析，可求得两个连队的战技术性能指标分值，如表 4 所示。

**Table 4.** Scores of technical indicators of equipment of two companies

**表 4.** 两个连队装备技术指标分值

完好等级	分值	$X(L_1)$	$X(L_2)$
一级完好装备	90	0.6667	0.4235
二级完好装备	80	0.3333	0.3529
三级完好装备	70	0	0.1765
四级完好装备	60	0	0.0471
待修装备	50	0	0
技术指标得分 $S(L)$		86.7	81.5

同理，可计算出主要部件寿命储备、配套性两个指标的分值：

$$\{77.8, 80.2\} \{81.2, 79.4\}$$

## (2) 运用模糊综合评价进行等级评定

装备故障影响程度指标是属于经验判断，通常由不同层级的装备使用管理人员进行评判。为确保对装备故障影响程度评价的科学客观，我们涵盖部队领导、业务机关、专家教授和连队人员等四个层级人员共同组成的多视角考评体系，并根据不同角色的实际作用合理设置权重，如表 5 所示。

**Table 5.** Multi-view composition and its weighting table

**表 5.** 多视角组成及其所占权重表

主评身份	部队领导	业务机关	专家教授	连队人员
权重	0.2	0.3	0.4	0.1

通过部队领导、业务机关、专家教授和连队人员不同评判者的综合打分，对装备故障影响程度指标进行经验评估，如表 6 所示。

**Table 6.** A list of scores on the impact of equipment failures

**表 6.** 装备故障影响程度得分一览表

主评身份	权重	$L_1$	$L_2$
部队领导	0.2	80.7	70.2
业务机关	0.3	85.2	75.3
专家教授	0.4	87.2	85.2
连队人员	0.1	81.2	80.2
总分		84.7	78.8

(3) 采取层次分析法计算指标权重[7] [8] [9]

计算装备完好率下属四个指标的权重，经过计算结果是：

$$\{0.641, 0.180, 0.111, 0.068\}$$

(4) 确定装备完好情况结果

利用齐次马氏链和模糊综合评价法计算的各指标得分与层次分析法确定的权重加权求和，计算两个连队的装备完好率总评结果，如表 7 所示。

**Table 7.** Overall evaluation results of equipment availability rate

**表 7.** 装备完好率总评结果

装备完好率指标	权重	$L_1$	$L_2$
战技术性能	0.641	86.7	81.5
主要部件寿命储备	0.180	84.8	78.8
配套性	0.111	77.8	80.2
故障影响度	0.068	81.2	79.4
总分		84.9	80.7

从中可知， $L_1$  连队装备完好率比  $L_2$  连队装备完好率情况要好。

## 5. 总结

本文通过运用齐次马氏链分析法、模糊综合评价法和层次分析法对部队装备完好率评定方法进行了探索，初步构建了评价模型，并通过实例计算验证该方法的可行性和创新性，特别是针对不同类型的装备使用单位，排除装备本身的差异后，对装备完好率的动态评估较为准确，为部队开展装备完好率评价提供了新的方法和思路。

## 参考文献

- [1] 王茁, 王亚彬, 徐帅. 基于 DT-Markov 的新型火炮身管状态预测[J]. 火力指挥与控制, 2023(9): 56-61.
- [2] 吴江. 基于马尔可夫链的飞机刹车片检查时间确定[J]. 机构研究与应用, 2021(5): 57-60.
- [3] 李亮, 宋敬华, 郭齐胜. 基于马尔可夫链的装备技术成熟度评估方法[J]. 火力指挥与控制, 2019, 44(2): 108-118.

- 
- [4] 周海涛, 缪书唯. 基于 Markov 链的光电转换系统可靠性评估与应用[J]. 电子测量技术, 2022(18): 55-63.
- [5] 袁赓, 王树刚, 黄一. 基于马尔可夫的埋地燃气钢管管壁腐蚀预测[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2010, 42(8): 1328-1331.
- [6] 冯虹, 邹华, 魏文元. 马尔可夫链在教学质量评价中的应用[J]. 天津师范大学学报: 自然科学版, 1999(1): 5-9.
- [7] 刘静. 基于层次分析法的职业教育评价指标体系建立与优化[J]. 现代职业教育, 2023(28): 17-20.
- [8] 赵天忠, 宁海强, 王行, 等. 基于模糊层次分析法的课程思政教学质量评价方法研究[J]. 常熟理工学院学报, 2023(5): 114-118.
- [9] 徐强, 金振中, 杨继刊, 等. 基于 Fuzzy-AHP 的武器装备作战试验鉴定指标体系评估[J]. 火力与指挥控制, 2021, 46(7): 175-180.