

doi: 10.7690/bgzdh.2026.06.003

基于维修单元的装备维修资源需求预测方法

连云峰, 牛刚, 韩宁, 梁晓龙

(中国人民解放军 32181 部队, 西安 710000)

摘要: 针对传统装备维修资源需求预测方法的不足, 提出基于维修单元的装备维修资源需求预测方法。建立基于维修任务相似度计算的维修单元设计模型, 预防性维修任务量和修复性维修任务量计算模型, 维修单元数量计算模型, 以及装备维修资源计算模型, 并结合实例验证该方法的可行性。应用结果表明: 该方法能科学确定装备维修保障机构维修资源需求, 提高装备维修资源的利用率, 为装备维修保障能力建设提供决策支持。

关键词: 维修单元; 装备维修; 维修资源; 需求预测; 任务量

中图分类号: TP207; E246 **文献标志码:** A

Equipment Maintenance Resource Demand Forecasting Method Based on Maintenance Unit

Lian Yunfeng, Niu Gang, Han Ning, Liang Xiaolong

(No. 32181 Unit of PLA, Xi'an 710000, China)

Abstract: Aiming at the deficiency of the traditional equipment maintenance resource demand forecasting method, the equipment maintenance resource demand forecasting method based on maintenance unit is proposed. The maintenance unit design model based on the similarity calculation of maintenance tasks, the calculation model of preventive maintenance tasks and corrective maintenance tasks, the calculation model of the number of maintenance units, and the calculation model of equipment maintenance resources are established, and the feasibility of the method is verified by an example. The application results show that the method can scientifically determine the maintenance resource demand of equipment maintenance support organization, improve the utilization rate of equipment maintenance resources, and provide decision support for the construction of equipment maintenance support capability.

Keywords: maintenance unit; equipment maintenance; maintenance resource; demand forecast; task quantity

0 引言

科学的预测维修资源需求是完成维修保障任务, 保持和恢复战斗力水平的先决条件。随着武器装备的发展, 武器装备的结构复杂、技术含量增加, 维修任务的完成需要多种维修资源共同参与和协作^[1], 传统的装备维修资源需求预测通常采用单人工时标准的计算方法进行, 这对于人力资源需求预测或单人维修的小型装备维修资源预测较为适用, 但无法适用于大型复杂装备维修资源的需求预测。为了适应当前装备维修任务的变化, 开展适应模块化编组的维修资源需求预测方法的研究, 建立以基本维修单元为基础的需求预测方法^[2-3]。

1 装备维修资源需求预测分析

1.1 装备维修任务分析

装备维修是为使装备保持、恢复规定的技术状态或改善装备性能而对装备进行维护和修理的活动。按维修性质和目的, 通常分为预防性维修、修

复性维修、改进性维修。

1) 预防性维修是通过系统检查和检测, 发现故障征兆并采取措施以防止故障发生所进行的维修, 通常包括擦拭、润滑、调整、监控、定期检查、定期拆修和定期更换等技术环节;

2) 修复性维修是为使故障装备、受损装备恢复规定的技术状态所进行的维修;

3) 改进性维修是为改善装备的技术性能或保障特性, 利用成熟技术对其进行的维修。

部队开展维修工作的主要内容是等级修理为主的预防性维修和修复性维修, 因而, 笔者将这 2 类任务作为维修资源需求预测的重点^[4]。

1.2 装备维修资源分析

装备维修任务的完成需要保障人员、维修设备、保障设施、维修器材、技术资料等要素有机组合和相互作用。其中, 维修人员是完成维修保障任务的主体, 包括: 具备专业素养、熟悉装备结构原理和

收稿日期: 2024-12-04; 修回日期: 2025-01-04

第一作者: 连云峰(1981—), 男, 河北人, 博士。

故障机理、掌握维修技能的专业人员；保障设备和保障设施是完成保障任务的手段和依托，特别是随着装备技术含量的提升，维修任务的完成愈发倚重保障设备和保障设施的使用；维修器材是完成维修保障任务的物质支撑，在“前换后修”作业方式下，维修器材对维修任务完成的作用更加凸显；技术资料是完成维修保障任务的依据，是开展维修保障活动的规范和标准。

1.3 维修单元分析

装备维修保障活动的开展，需要保障人员使用保障设备、保障设施、技术资料、维修器材等保障资源来进行，这些维修资源是维修保障力量不可或缺的重要组成，否则维修任务将无法完成；因此，将维修资源类型和数量的组合方式称为维修单元。维修保障单元能够在规定的时间内，利用最少的资源组合，独立完成一类或几类装备的部/组件维修，实现维修保障效能最大化。维修单元的对象在功能、结构、技术原理、故障模式等方面具有相似性，对这些维修对象使用的维修资源类型也基本一致。

2 装备维修资源需求预测思路

2.1 装备维修资源需求预测内容

装备维修资源需求预测的内容包括了维修资源类型和数量 2 方面的内容。由于笔者的研究是基于维修单元来开展的，因此，在装备维修资源类型预测上，应该能够支撑装备体系中所有维修保障任务的需要；在维修资源数量预测上，应该能够满足基本维修单元的资源需求的最大化。在维修单元数量确定的基础上，对所有维修保障单元的资源类型和数量进行综合计算，最终确定维修资源需求预测的内容^[5]。

2.2 维修资源需求预测过程

考虑到装备的类型各不相同，每类装备的故障模式、故障原因、修理方式等均不相同，如果仅以需要维修的装备或某部件修复的数量来表示维修任务量，不便于统计和计算。为此，笔者利用维修工时来进行维修任务量的统计，将不同类型的装备用相同的指标来反映和度量维修资源和维修时间的损耗；而对于基本维修单元的任务量，由于维修资源不能再进行拆分，因此，可以用基本维修单元的维修组时来表达每个维修单元的任务量，从而将所有任务量都统一到工时表示，便于计算，其过程如图

1 所示。

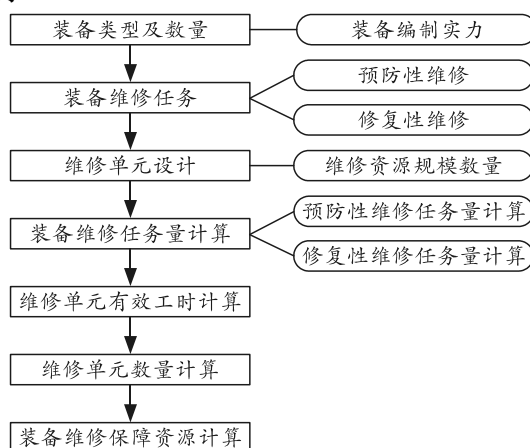


图 1 维修资源需求预测过程

Step1: 通过分析各单位的装备编制实力，可以获得各单位装备的类型和数量构成；

Step2: 依据装备类型和维修任务分配表，获得本单位所需要承担的维修任务；

Step3: 计算本单位维修单元构成和每类任务的平均作业时间；

Step4: 依据装备数量和维修任务分配表，计算在规定时间内基本维修单元维修任务总量；

Step5: 计算每类维修单元在规定内有效工时；

Step6: 计算维修单元维修任务总量与有效工时的比值，获得每类维修单元数量；

Step7: 依照每类维修单元维修资源规模、数量构成和每类维修单元数量，综合计算维修资源总量。

3 维修资源需求预测模型

3.1 基本保障单元设计模型

3.1.1 维修任务相似度计算

维修单元中维修资源规模数量的确定关系到维修资源的利用率，影响维修效益的发挥。维修单元的维修资源规模和数量过大，会造成大量的维修资源闲置；而维修单元的规模和数量过小，又会造成维修资源的品种类型过多，造成维修资源功能交叉重叠、重复^[6-7]。为了使维修单元的维修资源规模和数量适中，笔者采用基于维修任务相似度计算的方法来确定维修单元的维修对象，按照维修对象的需求来确定维修资源的规模和数量，提高维修资源的利用率和管理效益。

维修任务相似度计算是每类维修任务在维修资源类型和数量需求的基础上，利用改进的欧氏距离计算维修任务资源需求的相似度，根据维修任务相

似度进行维修任务的聚合分类，并依此构建维修单元，并确定维修单元维修资源的规模和数量^[8-9]。

利用欧氏距离计算维修任务相似度时，2 个维修任务欧氏距离越短，说明 2 个维修任务的相似度越高，在此基础上，通过对欧氏距离进行改进，获得 2 个维修任务的相似度，计算模型为：

$$S(T_i, T_j)=1-O(T_i, T_j)。(1)$$

式中： $S(T_i, T_j)$ 为任务 T_i 和 T_j 的相似度； $O(T_i, T_j)$ 为任务 T_i 和 T_j 的欧氏距离。当相似度 $S(T_i, T_j)$ 达到阈值时，任务 T_i 和 T_j 相似，聚合为一类基本维修单元，取 $S=0.7$ 。

设完成维修任务 T_i 和 T_j 所需的维修资源分别为 $R_i=(r_{i_1}, r_{i_2}, \dots, r_{i_n})$ 和 $R_j=(r_{j_1}, r_{j_2}, \dots, r_{j_n})$ ， n 表示完成维修任务所需的维修资源类型总数。

首先对维修资源需求数量进行 min-max 标准化处理，去除量纲，计算模型为：

$$r_{ij}^* = \frac{r_{ij} - \min(r_{ij})}{\max(r_{ij}) - \min(r_{ij})}。(2)$$

在标准化处理的基础上，计算维修任务之间的欧氏距离模型为：

$$O(T_i, T_j) = \sqrt{\sum_{k=1}^n \omega_k (r_{i_k} - r_{j_k})^2}。(3)$$

式中 r_{i_k} 和 r_{j_k} 为需要的第 k 类保障资源的数量。

2 个维修任务之间的相似度计算模型为：

$$S(T_i, T_j) = 1 - \sqrt{\sum_{k=1}^n \omega_k (r_{i_k} - r_{j_k})^2}。(4)$$

式中 ω_k 为第 k 类维修资源在计算相似度时的权重。

对于各类维修资源权重计算，可以采用定性和定量相结合的方法进行实现：首先，邀请领域专家，对各资源重要度进行排序；然后，在排序的基础上，计算各资源相对权重。相对权重计算模型为：

$$\omega = \begin{cases} 1, & i=1 \\ \frac{1}{2} + \frac{\sqrt{-2\ln\left(\frac{2(i-1)}{n}\right)}}{6}, & 1 < i \leq \frac{n+1}{2} \\ \frac{1}{2} - \frac{\sqrt{-2\ln\left(2 - \frac{2(i-1)}{n}\right)}}{6}, & \frac{n+1}{2} < i \leq n \end{cases}。(5)$$

式中： n 为指标个数； i 为重要度级别，由专家研讨决定，若指标同等重要，则 i 取值相同。

在计算获得相对权重的基础上，通过对相对权重进行归一化处理获得指标权重 ω^* 。

3.1.2 维修单元构建

通过维修任务相似度计算进行聚合后，得到的维修任务组就是某类维修单元所要完成的任务集合。因此，维修单元必须具备完成相应维修任务组中全部维修任务的能力。

在资源类型上，维修单元必须配置该维修任务组中全部维修任务所需的维修资源类型；在资源数量上，必须配置该维修任务组包含每类维修任务所需的维修资源的最大值。

设 $C(i, j)$ 是完成 T_i 和 T_j 的维修单元，则 $C(i, j)$ 的最小维修资源构成模型为：

$$R_{(i,j)}=(\max(r_{i_1}, r_{j_1}), \max(r_{i_2}, r_{j_2}), \dots, \max(r_{i_n}, r_{j_n}))。(6)$$

3.2 任务量计算模型

3.2.1 预防性维修任务量计算

装备预防性维修任务量主要与装备数量、装备使用计划、装备预防性维修间隔期等因素有关。装备的年度预防性维修频率的计算模型为：

$$fp_{il}=Z_i \times N_i / T_{il}。(7)$$

式中： fp_{il} 为装备体系中第 i 类装备第 l 级预防性维修频率； Z_i 为装备体系中第 i 种装备年度使用要求； N_i 为装备体系中第 i 类装备数量； T_{il} 为装备体系中第 i 种装备类型的第 l 级预防性维修的维修间隔期。

第 i 类装备第 k 种维修任务的第 l 级预防性维修的任务量计算模型为：

$$TP_{ik} = \sum_{l=1}^x fp_{il} t_{ikl} = \sum_{l=1}^x \frac{Z_i \times N_i}{T_{il}} \times t_{ikl}。(8)$$

式中： TP_{ik} 为第 i 类装备第 k 类维修任务预防性维修的任务量； t_{ikl} 为第 i 类装备的第 k 类维修任务实施第 l 类预防性维修所需的平均组时； x 为承担的预防性维修等级数量。

3.2.2 修复性维修任务量计算

装备修复性维修任务量主要与装备数量、装备使用计划、故障率、故障模式等因素有关。装备的年度修复性维修频率的计算模型为：

$$fc_{ik} = \sum_{q=1}^h N_i \times O_i \times \varphi_{ik} \times \lambda_{ik} \times (\alpha_{ikq} + \beta_{ikq})。(9)$$

式中： fc_{ik} 为装备体系中第 i 类装备第 k 类维修任务的频率； φ_{ik} 为第 i 种装备的第 k 类维修任务的比例； λ_{ik} 为通用装备体系中第 i 种装备的第 k 类维修任务的概率； α_{ikq} 为第 i 种装备的第 k 类维修任务的第 q 种故障模式的概率； β_{ikq} 为第 i 种装备的第 k 类维修任务的第 q 种故障模式由于非故障因素等导致的修

理概率； h 为第 i 类装备的第 k 类维修任务的故障模式数量。

当不能有效预计由于非故障因素导致的修理次数时，修复性维修保障工作的频次可近似用故障率代替。第 i 类装备第 k 类修复性维修任务的总任务量计算模型为：

$$TC_{ik} = \sum_{q=1}^h f_{ik} t_{ikq} = \sum_{q=1}^h N_i \times O_i \times \theta_{ik} \times \lambda_{ik} \times (\alpha_{ikq} + \mu_{ikq}) \times t_{ikq} \quad (10)$$

式中： TC_{ik} 为第 i 类装备第 k 类维修任务修复性维修的任务量； t_{ikq} 为完成与第 i 类装备第 k 类维修任务第 q 种故障模式所需要的平均组时。

3.3 维修资源需求计算

3.3.1 维修单元有效工时计算

维修单元有效工时，是指在规定的时限内可直接用于维修工作的有效时间，计算模型为：

$$T_u = D \times H \times \eta_e \times \eta_c \quad (11)$$

式中： T_u 为每个维修单元的有效时； D 为全年工作天数； H 为每天工作时间； η_e 为时间利用率，在装备维修过程中，会受到设备准备、器材请领等因素的影响； η_c 为人员利用率，主要表现为人员技能水平、作业环境等因素的影响^[10]。

3.3.2 装备维修资源数量预测

进行装备维修资源数量的预测，主要是考虑所有维修单元的有效工时不小于任务总量工时，在计算基本保障单元数量的基础上，再根据基本保障单元保障资源类型和数量构成，计算装备资源需求的总数量。

计算保障单元数量模型如下：

$$NX_i = \text{ceil} \left(\sum_{k=1}^n \frac{TP_{ik} + TC_{ik}}{Tu_k} \right) \quad (12)$$

式中： NX_i 为第 i 类基本保障单元数量； Tu_k 为第 i 类基本维修单元完成第 k 类部件维修所需要的平均时间； n 为与第 k 类维修任务相似的维修任务类型数量。

设 $E_i(i=1, 2, \dots, n)$ 为第 i 种维修资源类型， $E_{i=1, 2, \dots, n}$ 的计算模型为：

$$E_{i=1, 2, \dots, n} = \bigcup_{r=1}^p \bigcup_{j=1}^m U_{rj} \quad (13)$$

式中： U_{rj} 为第 r 类维修单元第 j 类维修资源类型； m 为每类维修单元所包含维修资源类型数量； p 为维修单元类型数量。

数量由所有维修单元所包含的所有维系资源类型决定，该类型维修资源数量计算模型为：

$$Q_{E_i} = \sum_{j=1}^m NX_{E_{ij}} \times M_{E_{ij}} \quad (14)$$

式中： Q_{E_i} 为力量元素 E_i 的数量； $NX_{E_{ij}}$ 为含有维修资源 E_i 的第 j 类基本保障单元的数量； $M_{E_{ij}}$ 为第 j 类基本保障单元中含有力量元素 E_i 的个数； m 为第 j 类基本保障单元的个数。

4 实例验证

笔者以某修理机构为例，对基于维修单元的装备维修资源需求预测方法的应用过程进行分析。

4.1 维修单元确定

假定该修理机构承担 3 类装备的维修，装备 1 的实力数为 40 台，装备 2 的实力数为 20 台，装备 3 的实力数为 30 台。完成装备产生的维修任务共需 9 类维修资源。每类装备所产生的维修任务，及其完成每类维修任务所需要的维修资源数量如表 1 所示。

表 1 维修保障任务及所需资源关系表

装备	维修任务	维修资源								
		r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	r_7	r_8	r_9
1	T_1	4	0	2	0	2	0	4	1	0
	T_2	0	3	4	3	4	3	0	0	3
	T_3	2	0	1	0	2	0	2	0	0
2	T_4	1	2	0	3	1	1	0	3	2
	T_5	1	0	2	0	2	1	3	2	0
3	T_6	0	4	3	1	0	0	2	0	6
	T_7	1	1	0	3	1	2	0	2	2
	T_8	0	2	5	3	4	5	0	0	4

首先，按照式(2)对各维修任务所需的维修资源数量进行标准化处理后，结果矩阵为：

$$\begin{bmatrix} 1.00 & 0 & 0.40 & 0 & 0.50 & 0 & 1.00 & 0.33 & 0 \\ 0 & 0.75 & 0.80 & 1 & 1 & 0.60 & 0 & 0 & 0.50 \\ 0.50 & 0 & 0.20 & 0 & 0.50 & 0 & 0.50 & 0 & 0 \\ 0.25 & 0.50 & 0 & 1 & 0.25 & 0.20 & 0 & 1 & 0.33 \\ 0.25 & 0 & 0.40 & 0 & 0.50 & 0.20 & 0.75 & 0.67 & 0 \\ 0 & 1 & 0.60 & 0.33 & 0 & 0 & 0.50 & 0 & 1 \\ 0.25 & 0.25 & 0 & 1 & 0.25 & 0.40 & 0 & 0.67 & 0.33 \\ 0 & 0.50 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0.67 \end{bmatrix} \quad (15)$$

各维修资源重要度排序结果：

$$S(r_i) = (3, 4, 6, 1, 2, 1, 7, 5, 6) \quad (16)$$

按照式(5)计算各维修资源权重结果为：

$$\omega^* = (0.120\ 3, 0.109\ 8, 0.070\ 8, 0.168\ 9, 0.133\ 3, 0.168\ 9, 0.059\ 1, 0.098\ 1, 0.070\ 8) \quad (17)$$

按照式(3)和(4)计算各任务相似度结果矩阵为：

$$\begin{bmatrix}
 1 & 0.262\ 3 & 0.758\ 0 & 0.366\ 7 & 0.701\ 6 & 0.382\ 3 & 0.393\ 4 & 0.196\ 4 \\
 0.262\ 3 & 1 & 0.357\ 5 & 0.488\ 4 & 0.364\ 1 & 0.442\ 0 & 0.544\ 4 & 0.803\ 3 \\
 0.758\ 0 & 0.357\ 5 & 1 & 0.414\ 7 & 0.746\ 2 & 0.476\ 5 & 0.463\ 6 & 0.278\ 8 \\
 0.366\ 7 & 0.488\ 4 & 0.414\ 7 & 1 & 0.482\ 3 & 0.456\ 9 & 0.975\ 5 & 0.393\ 9 \\
 0.701\ 6 & 0.364\ 1 & 0.746\ 2 & 0.482\ 3 & 1 & 0.454\ 9 & 0.506\ 8 & 0.307\ 8 \\
 0.382\ 3 & 0.442\ 0 & 0.476\ 5 & 0.456\ 9 & 0.454\ 9 & 1 & 0.456\ 8 & 0.337\ 7 \\
 0.393\ 4 & 0.544\ 4 & 0.463\ 6 & 0.843\ 4 & 0.506\ 8 & 0.456\ 8 & 1 & 0.478\ 1 \\
 0.196\ 4 & 0.803\ 3 & 0.278\ 8 & 0.393\ 9 & 0.307\ 8 & 0.337\ 7 & 0.478\ 1 & 1
 \end{bmatrix} \quad (18)$$

利用任务之间的相似度计算结果，按照式(6)确定维修单元类型及维修资源构成如表 2 所示。

表 2 维修单元维修资源构成

维修单元	维修任务	维修资源								
		r ₁	r ₂	r ₃	r ₄	r ₅	r ₆	r ₇	r ₈	r ₉
1	T ₁ 、T ₃ 、T ₅	4	0	2	0	2	0	4	2	0
2	T ₂ 、T ₈	0	3	5	3	4	5	0	0	4
3	T ₄ 、T ₇	1	2	0	3	1	2	0	3	2
4	T ₆	0	4	3	1	0	0	2	0	6

4.2 维修任务量计算

4.2.1 预防性维修任务量

该维修机构负责装备 1 和 3 的小修任务以及装备 2 的中修任务。按照式(7)和(8)计算该维修机构承担的预防性维修任务量，如表 3 所示。

表 3 年度预防性维修任务量

装备	维修任务	小修任务量			中修任务量		
		维修周期	平均工时/h	任务量	维修周期	平均工时/h	任务量
1	T ₁	0.4	40	16	—	—	—
	T ₂	0.4	60	24	—	—	—
	T ₃	0.4	50	20	—	—	—
2	T ₄	0.6	20	12	0.2	80	16
	T ₅	0.6	30	18	0.2	70	14
3	T ₆	0.3	20	6	—	—	—
	T ₇	0.3	30	9	—	—	—
	T ₈	0.3	10	30	—	—	—

4.2.2 修复性维修任务量

假定每类维修任务只有一种故障模式，按照式(9)和(10)计算该维修机构承担的修复性维修任务量，如表 4 所示。

表 4 年度修复性维修任务量

装备	维修任务	修复性维修任务量		
		维修周期	平均工时/h	任务量
1	T ₁	0.6	30	18
	T ₂	0.4	50	20
	T ₃	0.5	40	20
2	T ₄	0.4	30	12
	T ₅	0.6	40	24
3	T ₆	0.5	30	15
	T ₇	0.2	20	4
	T ₈	0.3	20	6

4.3 维修资源需求预测

4.3.1 维修保障单元数量

假定维修单元每年工作 260 d，每天工作 6 h，时间利用率和人员利用率分别为 0.8 和 0.7，按照式(11)计算每个维修单元全年有效工时为 873.6 h。

按照装备预防性维修任务量和修复性维修任务量，按照式(12)计算该维修机构的维修单元所承担的维修任务工时及维修单元数量，如表 5 所示。

表 5 维修任务工时及维修单元数量 h

维修单元	预防性维修工时	修复性维修工时	维修总工时	维修单元数量
1	2 080	2 000	4 080	5
2	1 860	980	2 840	4
3	830	360	1 190	2
4	450	180	630	1

4.3.2 维修资源数量

按照式(13)计算维修资源数量需求预测结果，如表 6 所示。

表 6 维修资源数量需求预测结果

维修单元	数量	维修资源								
		r ₁	r ₂	r ₃	r ₄	r ₅	r ₆	r ₇	r ₈	r ₉
1	5	20	0	10	0	10	0	20	10	0
2	4	0	12	20	12	16	20	0	0	16
3	2	2	4	0	6	2	4	0	6	4
4	1	0	4	3	1	0	0	2	0	6
合计		22	20	33	19	28	24	22	16	26

5 结论

笔者设计基于维修单元的维修资源需求预测方法，以维修单元为纽带，计算维修任务的数量和单元有效工时。应用结果表明：该方法能改善传统的维修资源需求预测的不足，科学确定维修资源类型、数量构成，提高维修资源利用率，为维修保障能力建设决策提供支撑。

参考文献：

[1] 谷玉波, 贾云献. 战基于维修任务的维修人员预测模型[J]. 火力与指挥控制, 2013, 38(11): 107-110.