

2-19-2020

## Demand Forecasting of Wartime Spares Based on Evidence Theory

Yunjing Zhang

*PLA Information and Technology University, Zhengzhou 450001, China;*

Xinxin Wang

*PLA Information and Technology University, Zhengzhou 450001, China;*

Wang Yang

*PLA Information and Technology University, Zhengzhou 450001, China;*

Guangming Tang

*PLA Information and Technology University, Zhengzhou 450001, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

## Demand Forecasting of Wartime Spares Based on Evidence Theory

### Abstract

**Abstract:** A new method based on evidence theory is proposed to solve the lack of data for the demand prediction of spares in wartime. Utilizing *Markov chain model* to research the rule of spares demand of peacetime from the historical data. A *Markov chain transfer probability adjustment strategy*, based on the change of combat intensity, is designed, which can be used to simulation the rule of spares demand in wartime. Under the experience of experts and the combination of *the Fuzzy theory and evidence theory*, the spares demand is wartime is forecasted. The simulation example shows that the method can effectively predict the spares demand of wartime.

### Keywords

wartime, demand forecasting of spares, evidence theory, combat intensity, Fuzzy theory

### Recommended Citation

Zhang Yunjing, Wang Xinxin, Wang Yang, Tang Guangming. Demand Forecasting of Wartime Spares Based on Evidence Theory[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(2): 314-322.

## 一种基于证据理论的战时备件需求预测方法

张云景, 王鑫鑫, 王洋, 汤光明

(解放军信息工程大学, 河南 郑州 450001)

**摘要:**为解决战时备件需求预测缺乏数据的问题,提出一种基于证据理论的战时备件需求预测方法。构建马尔可夫链模型,从备件需求历史数据中挖掘平时备件需求规律;进而设计一种基于战斗强度变化的战时备件需求马尔可夫链转移概率调整策略,用于模拟战时备件需求规律;最后结合专家经验,综合利用模糊理论和证据理论实现对战时备件需求的预测。仿真算例表明,该方法能够有效实现战时备件需求的预测。

**关键词:** 战时; 备件需求预测; 证据理论; 战斗强度; 模糊理论

中图分类号: TP182

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2020) 02-0314-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.17-9177

## Demand Forecasting of Wartime Spares Based on Evidence Theory

Zhang Yunjing, Wang Xinxin, Wang Yang, Tang Guangming

(PLA Information and Technology University, Zhengzhou 450001, China)

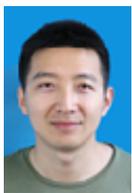
**Abstract:** A new method based on evidence theory is proposed to solve the lack of data for the demand prediction of spares in wartime. Utilizing *Markov chain model* to research the rule of spares demand of peacetime from the historical data. A *Markov chain transfer probability adjustment strategy*, based on the change of combat intensity, is designed, which can be used to simulation the rule of spares demand in wartime. Under the experience of experts and the combination of the *Fuzzy theory and evidence theory*, the spares demand is wartime is forecasted. The simulation example shows that the method can effectively predict the spares demand of wartime.

**Keywords:** wartime; demand forecasting of spares; evidence theory; combat intensity; Fuzzy theory

## 引言

备件需求确定是备件维修保障工作的首要步骤,备件需求预测是备件储备等一系统装备保障决策的重要依据,需求预测的准确程度直接影响着装备保障决策的结果。目前已有的备件需求预测方法大致可分为两种:一种将备件故障视为随机事件,

基于备件自身可靠性,估计备件消耗规律的数学分布来进行备件需求预测,如刘天华<sup>[1]</sup>的威布尔型分布模型,王乃超<sup>[2]</sup>的马尔可夫过程模型,易勇华<sup>[3]</sup>的指数型分布模型、董骁雄<sup>[4]</sup>的相似性理论和贝叶斯相结合的模型等等。然而,在估计备件消耗数学分布时往往需要设定很多比较严格的假设,与实际情况并不一致。一种基于历史数据,将备件消耗的历史数据视为时间序列,通过线性回归、机器学习等模型进行预测,如曹军海<sup>[5]</sup>的平滑指数时间序列模型,潘显俊<sup>[6]</sup>的分数阶离散灰色模型,王铁宁<sup>[7]</sup>的灰色加权马尔可夫模型,王梓行<sup>[8]</sup>的灰色系统和时间聚合组合模型等等,魏曦初<sup>[9]</sup>的基于影响因素



收稿日期: 2017-12-14 修回日期: 2018-04-01;  
基金项目: 国家社科基金军事学项目(13GJ003-066);  
作者简介: 张云景(1983-),男,河南南阳,博士,工程师,研究方向为装备保障与评估;王鑫鑫(1992-),女,河南郑州,博士,讲师,研究方向为装备采购;王洋(1985-),女,陕西西安,博士生,助工,研究方向为装备保障。

<http://www.china-simulation.com>

分析和数据重构的备件需求预测方法等等。然而, 基于历史数据的备件需求预测方法必须依赖于大量的数据, 对平时备件需求预测效果很好, 但不能适用于战时备件需求预测。

然而, 目前的研究大多集中于对平时备件需求研究, 而对战时备件需求预测研究还比较少。刘喜春<sup>[10]</sup>提出了基于模糊推理的战时备件需求预测方法, 结合专家预测值和体现需求量阶段相关性的 Markov 预测值, 生成模糊推理规则进而给出备件需求预测值。但他提出的马尔可夫链模型中的转移矩阵生成方法太过主观性, 并没有体现出战时与平时的区别。李晓燕<sup>[11]</sup>综合分析了战损对备件消耗的影响因素, 进而提出两类战损条件下备件需求预测的方法, 但其方法中战损率的确定具有很强的主观性。

在此基础上, 为了解决战时备件需求预测缺乏数据的问题, 本文提出了一种基于证据理论 (Dempster-Shafer evidence theory, DS 证据理论) 的战时备件需求预测方法, 将平时备件需求的历史数据与专家经验相结合, 将模糊理论与 DS 证据理论相融合, 实现对战时备件需求的预测, 为战时备件需求准确预测探索了一种新的思路。

## 1 DS 证据理论模型

战时备件需求的精确预测是实现战时备件联勤供应保障的关键, 是打赢现代化战争的重要组成部分。然而, 相对于平时的备件需求预测, 一方面战时备件需求预测缺乏相关的历史数据; 另一方面, 影响战时备件需求的因素有很多, 特别是极不确定性的战损因素, 大大提升了战时备件需求预测的难度。鉴于此, 为了提高战时备件需求预测的准确度, 本文提出了一种基于 DS 证据理论的战时备件需求预测方法, 其模型如图 1 所示。

此模型中战时备件需求预测的数据来源分为两部分: 专家经验和备件需求的历史数据。首先, 由于战时备件需求的数据相当缺乏甚至几乎没有, 专家经验是对备件需求预测的一种重要方式。其

次, 虽然战时备件需求的数据几乎没有, 但平时备件需求的数据却是十分丰富的, 而平时备件需求的数据一定能够为战时备件需求预测提供一定的信息, 因此本文通过挖掘平时备件需求数据, 设计了一种基于战斗强度变化的战时备件需求马尔可夫链转移概率矩阵, 用于模拟战时各阶段备件需求的转移规律。

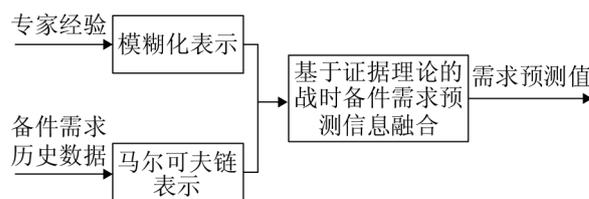


图 1 战时备件需求预测模型

Fig. 1 Wartime spares demand forecast model

在上述两种数据源基础上, 本文将模糊化作为 DS 证据理论中的一种概率分配函数, 将专家经验模糊化表示为向量  $Q_1$ , 而利用马尔可夫链作为 DS 证据理论中的另一种不同的概率分配函数, 将备件需求历史数据表示为  $Q_2$ , 进而利用 DS 证据理论融合  $Q_1$  和  $Q_2$ , 最终得出战时备件需求预测结果。

## 2 战时备件需求预测

### 2.1 专家经验的模糊化表示

在缺乏相关数据的条件下, 专家经验对战时备件需求预测显得十分重要。然而, 专家经验一般是用自然语言形式描述的, 是一个模糊变量, 例如专家经验可能被描述为“下一阶段备件需求在 60 个单位左右”。因此, 本文结合模糊理论和 DS 证据理论, 建立了战时备件预测的三元组  $\langle U, L, u_L \rangle$ , 其中  $U$  为论域、 $L$  为模糊集和  $u_L$  为隶属函数。而论域、模糊集和隶属函数分别相当于 DS 证据理论中的样本空间、子集和概率分配函数。

结合战时备件需求预测实际, 论域  $U=[0, H_{\max}]$ ,  $H_{\max}$  为战时备件需求实际数量最大值。依据经典的量化理论及心理学家米勒的试验表明, 在对不同的物体进行辨别时, 推荐使用 5 级、7 级和 9 级, 在此理论指导下, 结合战时备件需求论域  $[0, H_{\max}]$  的

实际及已有备件需求预测的相关研究,且为减少分级太多引起的计算量较大问题,因此本文将战时备件需求状态划分为  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$ 、 $L_4$  和  $L_5$  五个依次递增的级别,即模糊集  $L=\{L_1, L_2, L_3, L_4, L_5\}$ 。在模糊化过程中,隶属度函数用于计算各评价隶属属于某评价等级的程度。目前,应用最广泛的隶属函数构建方法有两种:三角形隶属函数和梯形隶属函数,其函数图像如图 2 所示。由于三角形隶属函数没有“水平”部分,对处于中间部分的评价值模糊化结果不够合理,不适合备件预测值模糊化要求,因此本文采用了梯形模糊化隶属函数,进而选取梯形分布的隶属度函数来描述每一个模糊子集,用三元组  $(K_i, a, b)$  表示,  $K_i$  为模糊子集梯形隶属度函数上底中点数值,  $a$ 、 $b$  分别为上底和下底宽度,又仅仅当  $a=1/6H_{\max}$ ,  $b=1/3H_{\max}$  时,能够保证利用梯形隶属度函数将论域  $[0, H_{\max}]$  分为 5 个等级,故设计如图 3 所示的战时备件需求量模糊隶属度函数。其中横坐标  $x$  表示备件需求数量,纵坐标  $u$  表示隶属度。

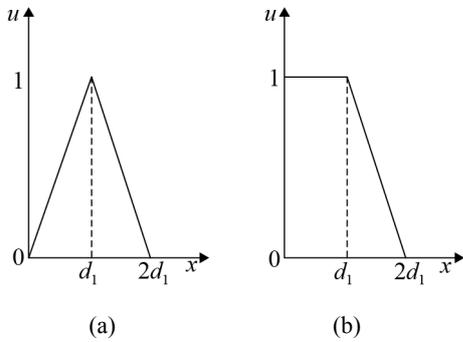


图 2 两种经典的模糊隶属度函数  
Fig. 2 Two classical fuzzy membership functions

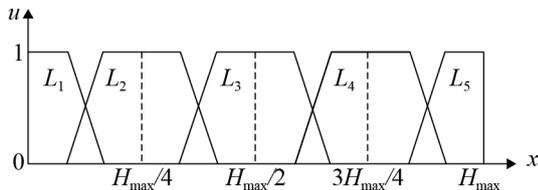


图 3 战时备件需求量模糊隶属度函数  
Fig. 3 Fuzzy membership function of wartime spare demand

如图 3 所示,当战时备件最大需求量  $H_{\max}$  取

120 时,对应的模糊子集  $L_3$  的隶属度函数为:

$$\mu_{L_3}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 40 \\ \frac{x-40}{10}, & 40 < x \leq 50 \\ 1, & 50 < x \leq 70 \\ \frac{80-x}{10}, & 70 < x \leq 80 \\ 0, & x > 80 \end{cases} \quad (1)$$

假设专家经验的自然语言描述为“下一阶段某备件需求在 45~55 个之间”,则用图 3 定义的模糊集及隶属度函数将其表示出来,为图 4 中的区域  $ABCD$ ,显然此区域仅与模糊子集  $L_2$  有交集  $EBF$ ,与  $L_3$  有交集  $EBCDG$ ,用交集与模糊子集的面积比作为模糊值,由此可知,针对模糊子集  $L_2$  的模糊值为  $S_{EBF} / S_{L_2} = 1.25 / 30 = 1/24$ ,针对模糊子集  $L_3$  的模糊值为  $S_{EBCDG} / S_{L_3} = 7.5 / 30 = 1/4$ ,则可用模糊集  $\{0, 1/24, 1/4, 0, 0\}$  来表示。

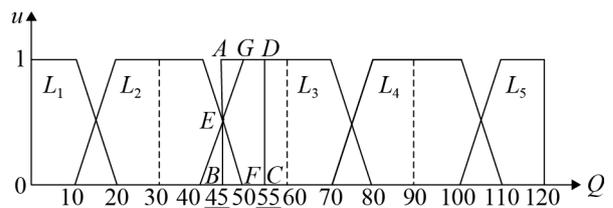


图 4 专家经验的模糊化表示  
Fig. 4 Fuzzy representation of expert experience

## 2.2 备件需求历史数据的马尔可夫链表示

### 2.2.1 平时备件需求历史数据的马尔可夫链表示

平时战备训练过程中,积累了大量的备件使用的历史数据,这些数据能够反应平时备件需求的规律。在物理学中,很多确定性现象遵从如下演变原则:由时刻  $t_0$  系统或过程所处的状态,可以决定系统或过程在时刻  $t > t_0$  所处的状态,而无需借助于以前系统所处状态的历史信息。这种性质称为马尔可夫性或无后效性,如式(2)所示:

$$p(x_{i+1} | x_i, x_{i-1}, \dots, x_1) = p(x_{i+1} | x_i) \quad (2)$$

在备件需求预测的研究中,由于平时战备训练的阶段相关性,下一阶段的备件需求可认为只与当前阶段的备件需求有关,而无需接借助于备件以前阶段的需求。因此,本文将平时备件需求视为符合

马尔可夫链性质的离散随机过程, 进而利用马尔可夫链模型进行知识挖掘, 从而得到用于反映平时备件需求规律的马尔可夫转移概率矩阵, 为进一步挖掘战时备件需求规律打下基础。为了建立平时备件需求的马尔可夫模型, 首先给出以下定义。

定义 1 平时备件需求状态  $M=\{M_1, M_2, M_3, M_4, M_5\}$ , 用于表示平时某阶段备件需求的一种状态, 与战时备件需求状态  $L=\{L_1, L_2, L_3, L_4, L_5\}$  类同, 分为  $M_1, M_2, M_3, M_4, M_5$  五个依次递增的级别。

定义 2 平时备件需求状态转移概率  $p_{ij}$ , 用于表示从一个平时备件需求状态转移到另一个状态的概率, 即:

$$p_{ij} = p(M_i \rightarrow M_j)$$

定义 3 平时备件需求状态转移概率矩阵  $P$ , 由所有平时备件需求状态之间的转移状态概率构成, 若  $M$  有  $n$  个状态, 则  $P$  为  $n \times n$  的矩阵, 即:

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \cdots & p_{nn} \end{bmatrix}$$

于是, 平时备件需求历史数据的马尔可夫链表示具体过程可由两步构成:

#### (1) 平时备件需求状态的确定

平时备件需求的历史数据, 常常表现为周期性的备件消耗量, 将各个周期内的备件消耗量视为此周期的备件需求量, 利用简单的极差法将各个周期内的备件需求量由少到多划分为 5 种状态:

①找出备件需求的历史数据中的最大值  $X_{\max}$  和  $X_{\min}$ , 确定取值空间为  $[X_{\min}, X_{\max}]$ ;

②确定状态步长  $H=(X_{\max}-X_{\min})/5$ ;

③将各个周期内的备件需求量转化为该周期内的需求状态, 若一周期内的备件需求量为  $x$ , 则其需求状态为  $M_{\lfloor(x-X_{\min})/H\rfloor+1}$ , 其中  $\lfloor(x-X_{\min})/H\rfloor$  为  $(x-X_{\min})/H$  的商。

#### (2) 转移概率的确定

一般来说, 状态转移概率的实际理论值是不可知的, 在具备大量备件需求历史数据的前提下, 为

求出  $p_{ij}$ , 可用频率逼近概率的思想, 通过统计不同状态之间的相互转移频率来模拟实际的状态转移概率, 即:

$$p_{ij} = p(M_i \rightarrow M_j) = \frac{\text{sum}(M_i \rightarrow M_j)}{\text{sum}(M_i)} \quad (3)$$

式中:  $\text{sum}(M_i)$  为处于状态  $M_i$  的所有样本数量;  $\text{sum}(M_i \rightarrow M_j)$  为由状态  $M_i$  转移到状态  $M_j$  的样本数量。

通过此方法可得出所有的平时备件需求状态转移概率  $p_{ij}$ , 也就可得平时备件需求状态转移概率矩阵  $P$ 。

### 2.2.2 战时备件需求规律的马尔可夫链表示

一般来说, 备件消耗与备件使用环境关系很大, 据外军研究结果表明, 严酷环境下备件消耗量  $d'_m(t)$  是正常环境消耗量  $(1+k)$  倍。例如美军陆战队将  $k$  定为  $0.75^{[12]}$ 。设某种备件正常使用消耗量为  $d_m(t)$ , 则:

$$d'_m(t) = (1+k)d_m(t) \quad (4)$$

相对于平时, 战时备件消耗与战场环境、作战条件、作战样式等多种因素有关。针对战时备件需求预测问题, 本文将战场环境、作战条件、作战样式等多种作战因素抽象为战斗强度来统一刻画, 下面给出战斗强度定义。

定义 4 战斗强度  $\alpha=\{1, 2, 3, 4, 5\}$ , 用以刻画战时备件使用环境的严酷程度, 即战斗强度越大, 表明备件使用的环境越严酷, 备件消耗量也相对越大。将战斗强度分为 5 个递增等级, 其中, 1 表示和平时保持一致; 2, 3, 4, 5 战斗强度依次递增。战斗强度的确定一般依据专家经验。

由 2.2.1 小节知, 平时备件需求状态转移概率能够反映平时备件需求规律, 对于同一种备件而言, 战斗强度是影响平时与战时备件需求出现差异变化的最重要原因, 为了实现对战时备件需求的预测, 本文依据平时备件需求转移概率, 结合战斗强度定义, 设计了一种基于战斗强度变化的战时备件需求马尔可夫链转移概率调整策略, 用于模拟战时备件需求规律, 为战时备件需求的准确预测提供一种新的思路。

类比于平时备件需求的相关定义, 用  $p'_{ij}$  表示战时备件需求状态转移概率, 即  $p'_{ij} = p(L_i \rightarrow L_j)$ , 用  $\mathbf{P}'$  表示战时备件需求状态转移概率矩阵。特别地, 对于任意的  $1 \leq i, j \leq 5$ , 用  $\Delta_{ij}$  表示战时备件需求状态转移概率相对于平时备件需求状态转移概率的变化量, 显然  $\Delta_{ij}$  与战斗强度  $\alpha$  有关,  $\alpha$  越大, 则  $\Delta_{ij}$  越大, 反之越小。

一方面, 公式(4)展示了目前国际公认、美军已使用的战时备件与平时备件需求的线性关系, 本文提出“战斗强度”概念, 相当于公式(4)中的备件使用环境概念, 即认为  $\Delta_{ij}$  与战斗强度  $\alpha$  呈线性关系; 另一方面, 在线性关系基础上增加了调整系数  $\eta$ , 使得的  $\Delta_{ij}$  调整更加灵活, 即可针对不同的备件灵活调整, 依据本文仿真部分所用的备件, 我们发现设置  $\eta=0.01$  较为合理, 既能体现战时与平时备件需求转移概率的差异, 又使得其变化相对平滑; 此外, 由于战时相对于平时具有持续时间短的特点, 则战时存在较短时间需求较多备件的规律, 为了保证战时备件需求预测的略有“盈余”, 则设计了等级差越大,  $\Delta_{ij}$  越大的原则。结合上述 3 方面考虑, 本文设计了一种基于战斗强度变化的战时备件需求马尔可夫链转移概率调整策略, 如表 1 所示。其中,  $\eta$  为调整系数, 用于调整  $\Delta_{ij}$  的变化幅度;  $\alpha$  为战斗强度。

表 1 基于战斗强度变化的战时备件需求马尔可夫链转移概率调整策略

Tab. 1 Strategy of Markov chain transfer probability adjustment strategy for spares demand of wartime based on the change of combat intensity

$\Delta_{ij}$	$j=1$	$j=2$	$j=3$	$j=4$	$j=5$
$i=1$	0	$+\eta\alpha$	$+2\eta\alpha$	$+3\eta\alpha$	$+4\eta\alpha$
$i=2$	$-\eta\alpha$	0	$+\eta\alpha$	$+2\eta\alpha$	$+3\eta\alpha$
$i=3$	$-2\eta\alpha$	$-\eta\alpha$	0	$+\eta\alpha$	$+2\eta\alpha$
$i=4$	$-3\eta\alpha$	$-2\eta\alpha$	$-\eta\alpha$	0	$+\eta\alpha$
$i=5$	$-4\eta\alpha$	$-3\eta\alpha$	$-2\eta\alpha$	$-\eta\alpha$	0

依据表 1 可得出由平时备件需求状态转移概率矩阵  $\mathbf{P}$  求战时备件需求转移概率矩阵  $\mathbf{P}'$  的方法, 即:

(1) 计算  $\mathbf{P}+\Delta$ , 得一新矩阵  $\mathbf{P}_\Delta$ , 即  $\mathbf{P}_\Delta=\mathbf{P}+\Delta$ , 对于  $\mathbf{P}_\Delta$  中的任一元素  $\mathbf{P}_\Delta(ij)$ , 若  $\mathbf{P}_\Delta(ij)<0$ , 则将其重新赋 0 值, 以保证概率必不小于 0。

(2) 对矩阵  $\mathbf{P}_\Delta$  的每一行作归一化处理, 以保证马尔可夫转移概率性质, 即各行概率和为 1, 归一化处理后的矩阵即为  $\mathbf{P}'$ 。

此方法得出的  $\mathbf{P}'$  是战时备件需求规律的马尔可夫链表示, 显然它由平时备件需求状态转移规律和战斗强度决定。

### 2.3 基于 DS 证据理论的战时备件需求预测信息融合

DS 证据理论满足比概率弱的公理, 能够区分“不确定”与“不知道”的差异, 并能处理由“不知道”引起的不确定性, 具有很大的灵活性, 是一种重要而有效的不确定性推理方法。本文中战时备件需求预测的数据来源有两方面: 专家经验和平时备件需求的历史数据。2.1 和 2.2 小节分别对专家经验和平时备件需求的历史数据进行了相应的表示, 在此基础上, 本节利用 DS 证据理论对这两方面的信息融合, 进而得到更加准确的战时备件需求预测结果。

结合战时备件需求预测问题, 此问题的样本空间为  $L=\{L_1, L_2, L_3, L_4, L_5\}$ , 有两种不同的概率分配函数: 一种来源于专家经验的模糊化表示  $Q_1$ ; 另一种来源于战时备件需求规律的马尔可夫链表示  $Q_2$ 。不妨设  $Q_1=\{0, 1/24, 1/4, 0, 0\}$ ,  $Q_2=\{0, 0.15, 0.75, 0.1, 0\}$ , 即:  $Q_1(\{L_1\})=0$ ,  $Q_1(\{L_2\})=1/24$ ,  $Q_1(\{L_3\})=1/4$ ,  $Q_1(\{L_4\})=0$ ,  $Q_1(\{L_5\})=0$ ,  $Q_1(\{L\})=17/24$ ;  $Q_2(\{L_1\})=0$ ,  $Q_2(\{L_2\})=0.15$ ,  $Q_2(\{L_3\})=0.75$ ,  $Q_2(\{L_4\})=0.1$ ,  $Q_2(\{L_5\})=0$ ,  $Q_2(\{L\})=0$ 。此时需要对  $Q_1$  和  $Q_2$  进行证据组合, 本文利用概率分配函数正交和的方式进行组合。

定义 5 设  $Q_1$  和  $Q_2$  是两个概率分配函数, 则其正交和  $Q=Q_1 \oplus Q_2$  为

$$Q(\Phi) = 0 \quad (5)$$

$$Q(\{L_i\}) = K^{-1} \times [Q_1(\{L_i\}) \times Q_2(\{L_i\}) + Q_1(\{L_i\}) \times Q_2(\{L\}) + Q_1(\{L\}) \times Q_2(\{L_i\})] \quad (6)$$

$$K = Q_1(\{L\}) \times Q_2(\{L\}) + \sum_{i=1}^5 [Q_1(\{L_i\}) \times Q_2(L_i) + Q_1(\{L_i\}) \times Q_2(L) + Q_1(\{L\}) \times Q_2(L_i)] \quad (7)$$

利用定义 5 知:

$$K = Q_1(\{L\}) \times Q_2(\{L\}) + \sum_{i=1}^5 [Q_1(\{L_i\}) \times Q_2(L_i) + Q_1(\{L_i\}) \times Q_2(L) + Q_1(\{L\}) \times Q_2(L_i)] =$$

$$0 + 0 + \frac{1}{24} \times 0.15 + 0.15 \times \frac{17}{24} + 0.25 \times 0.75 +$$

$$0.75 \times \frac{17}{24} + 0.1 \times \frac{17}{24} = \frac{433}{480}$$

$$Q(\{L_1\}) = 0, Q(\{L_2\}) = \frac{54}{433}, Q(\{L_3\}) = \frac{345}{433},$$

$$Q(\{L_4\}) = \frac{34}{433}, Q(\{L_5\}) = 0, Q(\{L\}) = 0$$

$Q$  则为两种证据最终融合的结果, 进而通过去模糊化可得出战时备件需求量预测结果值。去模糊化方法比较多, 常见的有最大隶属度法和重心法, 其中重心法能够均衡考虑全部的模糊信息, 使结果更加平滑, 固本文采用重心法。具体地利用重心法将模糊向量转化为精确值  $u$  的计算如公式(8)所示:

$$u = \frac{\sum_i u_i \cdot \mu(u_i)}{\sum_i \mu(u_i)} \quad (8)$$

由公式(8)可知, 战时下一阶段备件需求的数量为 59 个。

### 3 算例仿真

本文备件 X 作为战时备件需求预测进行仿真, 目前已知此备件 2005-2016 年各月消耗量, 如表 2 所示。现假定战时当前阶段的备件消耗数为 56 个, 依据专家经验得出下一阶段的战斗强度为 3, 下一阶段备件需求数为 65~75 个之间左右, 下面给出利用本文方法对下一阶段备件需求进行准确预测的仿真过程。

#### (1) 专家经验的模糊化表示

专家预测下一阶段的备件需求量为 65~75 个左右, 由 2.1 的方法知, 得出的专家经验模糊集为  $Q_1 = \{0, 0, 1/24, 1/4, 0\}$ 。

#### (2) 平时备件需求历史数据的马尔可夫链表示

由 2.2.1 小节所示方法, 依据表 2 易知,  $X_{\max} = 58$ 、 $X_{\min} = 34$ 、 $H = (X_{\max} - X_{\min}) / 5 \approx 5$ , 故可知  $M_1$  状态所有可能的取值为(34, 35, 36, 37, 38),  $M_2$  状态所有可能的取值为(39, 40, 41, 42, 43), 其余状态类推。则利用极差法将各个周期内的备件消耗量划分为不同状态, 结果如表 3 所示。

表 2 2005-2016 年备件 X 消耗历史数据

Tab. 2 Spare X consumption historical data in 2005-2016

年度	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2005	46	52	43	53	42	48	36	43	50	53	42	44
2006	39	44	42	48	53	48	56	55	46	56	48	43
2007	44	45	52	53	51	49	53	49	41	51	37	46
2008	37	44	44	46	48	52	57	44	48	50	39	54
2009	43	46	56	44	38	46	49	50	51	48	44	43
2010	41	53	43	44	58	47	59	46	49	47	46	43
2011	44	51	45	44	53	48	51	49	50	38	44	46
2012	46	46	38	55	58	48	36	39	41	55	58	40
2013	40	48	56	44	47	40	54	41	42	36	43	38
2014	42	41	42	46	39	58	40	45	44	54	51	34
2015	48	38	48	47	49	48	46	43	34	49	51	36
2016	39	40	46	46	44	41	50	36	41	44	46	47

表 3 2005-2016 年备件 X 消耗状态情况  
Tab. 3 Spare X consumption status in 2005-2016

年度	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2005	$M_3$	$M_4$	$M_2$	$M_4$	$M_2$	$M_3$	$M_1$	$M_2$	$M_4$	$M_4$	$M_2$	$M_3$
2006	$M_2$	$M_3$	$M_2$	$M_3$	$M_4$	$M_3$	$M_5$	$M_5$	$M_3$	$M_5$	$M_3$	$M_2$
2007	$M_3$	$M_3$	$M_4$	$M_4$	$M_4$	$M_4$	$M_4$	$M_4$	$M_2$	$M_4$	$M_1$	$M_3$
2008	$M_1$	$M_3$	$M_3$	$M_3$	$M_3$	$M_4$	$M_5$	$M_3$	$M_3$	$M_4$	$M_2$	$M_5$
2009	$M_2$	$M_3$	$M_5$	$M_3$	$M_1$	$M_3$	$M_4$	$M_4$	$M_4$	$M_3$	$M_3$	$M_2$
2010	$M_2$	$M_4$	$M_2$	$M_3$	$M_5$	$M_3$	$M_5$	$M_3$	$M_4$	$M_3$	$M_3$	$M_2$
2011	$M_3$	$M_4$	$M_3$	$M_3$	$M_4$	$M_3$	$M_4$	$M_4$	$M_4$	$M_1$	$M_3$	$M_3$
2012	$M_3$	$M_3$	$M_1$	$M_5$	$M_5$	$M_3$	$M_1$	$M_2$	$M_2$	$M_5$	$M_5$	$M_2$
2013	$M_2$	$M_3$	$M_5$	$M_3$	$M_3$	$M_2$	$M_5$	$M_2$	$M_2$	$M_1$	$M_2$	$M_1$
2014	$M_2$	$M_2$	$M_2$	$M_3$	$M_2$	$M_5$	$M_2$	$M_3$	$M_3$	$M_5$	$M_4$	$M_1$
2015	$M_3$	$M_1$	$M_3$	$M_3$	$M_4$	$M_3$	$M_3$	$M_2$	$M_1$	$M_4$	$M_4$	$M_1$
2016	$M_2$	$M_2$	$M_3$	$M_3$	$M_3$	$M_2$	$M_4$	$M_1$	$M_2$	$M_3$	$M_3$	$M_3$

以  $M_1$  状态为例, 表中共有 14 个  $M_1$  状态, 其中由状态  $M_1$  转移到状态  $M_2$  的数量为 6 个, 分别为 2005 年 7-8 月、2012 年 7-8 月、2013 年 10-11 月、2013 年 12 月-2014 年 1 月、2015 年 12 月-2016 年 1 月、2016 年 8-9 月, 由公式(3)可知  $p_{12}=6/14$ , 同此方法, 可计算所有状态转移概率, 最终得到平时备件需求状态转移矩阵如下:

$$P = \begin{bmatrix} 0 & 6 & 6 & 1 & 1 \\ 14 & 14 & 14 & 14 & 14 \\ 3 & 7 & 13 & 5 & 4 \\ 32 & 32 & 32 & 32 & 32 \\ 6 & 9 & 19 & 11 & 7 \\ 53 & 53 & 53 & 53 & 53 \\ 5 & 6 & 6 & 11 & 1 \\ 29 & 29 & 29 & 29 & 29 \\ 0 & 4 & 8 & 1 & 3 \\ 16 & 16 & 16 & 16 & 16 \end{bmatrix}$$

(3) 战时备件需求规律的马尔可夫链表示

由 2.2.2 小节所示方法, 当战斗强度  $\alpha=3$ , 调整系数为  $\eta=0.01$  时, 可得

$$\Delta = \begin{bmatrix} 0 & 0.03 & 0.06 & 0.09 & 0.12 \\ -0.03 & 0 & 0.03 & 0.06 & 0.09 \\ -0.06 & -0.03 & 0 & 0.03 & 0.06 \\ -0.09 & -0.06 & -0.03 & 0 & 0.03 \\ -0.12 & -0.09 & -0.06 & -0.03 & 0 \end{bmatrix}$$

$$P_{\Delta} = P + \Delta =$$

$$P' = \begin{bmatrix} 0 & 0.4586 & 0.4886 & 0.1614 & 0.1914 \\ 0.0638 & 0.2188 & 0.4363 & 0.2163 & 0.2150 \\ 0.0532 & 0.1398 & 0.3585 & 0.2375 & 0.1921 \\ 0.0824 & 0.1469 & 0.1769 & 0.3793 & 0.0645 \\ -0.1200 & 0.1600 & 0.4400 & 0.0325 & 0.1875 \\ 0 & 0.3527 & 0.3758 & 0.1242 & 0.1473 \\ 0.0554 & 0.1902 & 0.3793 & 0.1880 & 0.1870 \\ 0.0542 & 0.1425 & 0.3654 & 0.2421 & 0.1958 \\ 0.0970 & 0.1728 & 0.2081 & 0.4462 & 0.0759 \\ 0 & 0.1951 & 0.5366 & 0.0396 & 0.2287 \end{bmatrix}$$

(4) 基于 DS 证据理论的战时备件需求预测信息融合

专家预测下一阶段的备件需求量为 65~75 个左右, 得出的专家经验模糊集为  $Q_1 = \{0, 0, 1/24, 1/4, 0\}$ ; 又有当前阶段备件消耗量为 56 个, 由 2.1 小节方法知, 其模糊化表示为  $\{0, 0, 1, 0, 0\}$ , 则

$$Q_2 = [0, 0, 1, 0, 0]P' = \{0.0542, 0.1425, 0.3654, 0.2421, 0.1958\}$$

$$K = Q_1(\{L\}) \times Q_2(\{L\}) +$$

$$\sum_{i=1}^5 [Q_1(\{L_i\}) \times Q_2(L_i) + Q_1(\{L_i\}) \times Q_2(L) + Q_1(\{L\}) \times Q_2(L_i)] =$$

$$0 + 0.0542 \times \frac{17}{24} + 0.1425 \times \frac{17}{24} + \frac{1}{24} \times 0.3654 + 0.3654 \times \frac{17}{24} +$$

$$\frac{1}{4} \times 0.2421 + 0.2421 \times \frac{17}{24} + 0.1958 \times \frac{17}{24} \approx 0.784$$

$$Q(\{L_i\}) = K^{-1} \times [Q_1(\{L_i\}) \times Q_2(\{L_i\}) + Q_1(\{L_i\}) \times Q_2(\{L\}) + Q_1(\{L\}) \times Q_2(\{L_i\})]$$

$$Q(\{L_1\}) = 0.049, Q(\{L_2\}) = 0.129,$$

$$Q(\{L_3\}) = 0.349, Q(\{L_4\}) = 0.296,$$

$$Q(\{L_5\}) = 0.177, Q(\{L\}) = 0$$

最后, 通过公式(8)去模糊化得到下一阶段备件需求的数量为 73 个。

## 4 结论

备件需求预测是备件供应保障的基础, 准确有效的备件需求预测能够为指挥者提供重要的决策依据。相对于平时的备件需求预测, 影响战时备件需求的不确定性因素有很多, 且缺乏相关的历史数据, 导致战时备件需求预测的难度大大提升。目前针对战时备件需求预测的研究还比较少, 且主观性太强, 为解决战时备件需求预测缺乏数据的问题, 提出一种基于 DS 证据理论的战时备件需求预测方法。将平时备件需求的历史数据与专家经验相结合, 将模糊理论与 DS 证据理论相融合, 实现对战时备件需求的预测, 为战时备件需求准确预测研究探索了一种新的思路。下一步的研究主要在结合战时备件消耗特点, 进一步优化并完善于战斗强度变化的战时备件需求马尔可夫链转移概率调整策略, 使预测结果更加可信。

## 参考文献:

- [1] 刘天华, 张志华, 李庆民, 等. 威布尔型多不可修部件备件需求确定方法[J]. 系统工程理论与实践, 2012, 32(9): 2010-2015.  
Liu Tianhua, Zhang Zhihua, Li Qingmin, et al. Determination Method of The Spare Demand for Multiple Components with Weibull Distribution[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2012, 32(9): 2010-2015.
- [2] 王乃超, 康锐, 程海龙. 基于马尔可夫过程的备件库存动态特性分析[J]. 兵工学报, 2009, 30(7): 984-988.  
Wang Naichao, Kang Rui, Cheng Hailong. Study on the Dynamic Characteristics of Spare Inventory Based on Markov Process[J]. Acta Armamentarii, 2009, 30(7): 984-988.
- [3] 易勇华, 傅健, 王春枝, 等. 指数型有寿件备件需求预测模型[J]. 兵器装备工程学报, 2017, 38(11): 89-92.  
Yi Yonghua, Fu Jian, Wang Chunzhi, et al. Prediction Model of Demands for Life-limited Spares with Exponential Distribution[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2017, 38(11): 89-92.
- [4] 董晓雄, 陈云翔, 项华春, 等. 基于 SST 和 Bayes 的初始备件需求确定方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2018, 44(2): 316-321.  
Dong Xiaoxiong, Chen Yunxiang, Xiang Huachun, et al. Determination Method of Initial Spares Requirement Based on SST and Bayes Theory[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2018, 44(2): 316-321.
- [5] 曹军海, 杜海东, 陈小龙, 等. 基于平滑指数仿真优化的装甲装备器材消耗预测[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(8): 1961-1965.  
Cao Junhai, Du Haidong, Chen Xiaolong, et al. Forecasting Research for Maintenance Support Materials of Armored Equipments Based on Simulation Optimization of Eoefficient of Exponential Smoothing Method[J]. Journal of System Simulation, 2013, 25(8): 1961-1965.
- [6] 潘显俊, 张炜, 赵田, 等. 分数阶离散灰色模型及其在备件需求预测中的应用[J]. 兵工学报, 2017, 38(4): 785-792.  
Pan Xianjun, Zhang Wei, Zhao Tian, et al. Fractional Order Discrete Grey Mode and Its Application in Spare Parts Demand Forecasting[J]. Acta Armamentarii, 2017, 38(4): 785-792.
- [7] 王铁宁, 朱域, 陈晓晨. 基于灰色加权马尔可夫的备件需求预测[J]. 装甲兵工程学院学报, 2015, 29(3): 8-13.  
Wang Tiening, Zhu Yu, Chen Xiaochen. Spare Parts Demand Forecasting Based on the Gray Weighted Markov Method[J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2015, 29(3): 8-13.
- [8] 王梓行, 韩维, 苏析超. 舰载机间断型备件的需求预测方法[J]. 兵工自动化, 2017, 36(5): 40-43.  
Wang Zihang, Han Wei, Su Xichao. Demand Forecast Method of Intermittent Spare Parts for Carried-based Aircraft[J]. Ordnance Industry Automation, 2017, 36(5): 40-43.
- [9] 魏曦初, 李文立, 邱立鹏. 基于影响因素分析和数据重构的备件需求预测[J]. 计算机应用研究, 2017, 34(5): 1419-1422.  
Wei Xichu, Li Wenli, Qiu Lipeng. Spare psrts demand prediction based on influence factors analysis and data

- reconstruct[J]. *Application Research of Computer*, 2017, 34(5): 1419-1422.
- [10] 刘喜春, 祝龙石, 张伟. 基于模糊推理的战时备件需求预测[J]. *兵工学报*, 2013, 34(9): 1197-1200.  
Liu Xichun, Zhu Longshi, Zhang Wei. Demand Forecasting of Fuzzy Inference-based Wartime Spares[J]. *Acta Armamentarii*, 2013, 34(9): 1197-1200.
- [11] 李晓燕, 宋建社, 毋文峰, 等. 基于战斗损伤的备件消耗预测仿真建模方法研究[J]. *系统仿真学报*, 2013, 25(增 1): 99-103.  
Li Xiaoyan, Song Jianshe, Wu Wenfeng, et al. Forecast Simulation Model of Spare Parts Requirement under Combat Damage[J]. *Journal of System Simulation*, 2013, 25(S1): 99-103.
- [12] 孙胜祥, 李征宇, 安天霞. 备件战时存储费用需求预测研究[J]. *武汉理工大学学报(信息与管理工程版)*, 2007, 29(1): 150-152.  
Sun Shengxiang, Li Zhengyu, An Tianxia. Research on storage cost demand prediction of spare parts during wartime[J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Information & Management Engineering)*, 2007, 29(1): 150-152.