

# 在役农机装备预防性成组维修策略研究

柳 剑 魏 泉 叶 进 曾百功 李明生

(西南大学工程技术学院, 重庆 400715)

**摘要:** 针对目前在役农机装备的维修策略主要采用事后维修方式, 维修策略经济性差、维修效率低, 甚至无法完全保证农机装备服役阶段可靠性与安全性的问题, 提出了一种在役农机装备预防性成组维修策略。首先, 采用模糊聚类分析法对农机装备的故障数据进行分类等级化处理, 建立了基于改进竞争威布尔分布的农机装备可靠度评估模型, 并对其可靠性水平进行定量评价; 其次, 基于农机装备季节性服役的特征与维修的经济相关性, 给出了预防性成组维修时间间隔和维修时机的算法模型; 最后, 考虑维修人员与农机装备服役数量之间的关系, 建立了以最小维修费用为目标的算法模型, 得出了农机装备成组维修计划。结合重庆市某农场 10 台小型联合收获机的历史故障数据以及成本数据, 给出了成组维修策略在农机装备服役阶段的具体实施案例。通过 2 个案例分析结果表明, 与传统事后维修方式相比, 预防性成组维修策略减少了总维修次数, 总维修费用分别降低了 22.37% 与 19.11%, 从而验证了预防性成组维修策略在农机装备服役阶段应用的有效性。本文提出的方法为农机装备维修策略的研究工作提供了参考和借鉴。

**关键词:** 农机装备; 成组维修; 可靠性; 维修时机; 维修费用

**中图分类号:** TH17; S220.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2020)S2-0316-07

## Preventive Group Maintenance Strategy for In-service Agricultural Machinery Equipment

LIU Jian WEI Xiao YE Jin ZENG Baigong LI Mingsheng

(College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China)

**Abstract:** The current maintenance strategy for the in-service agricultural machinery equipment is mainly post maintenance, which often results in poor economy, low maintenance efficiency, and the inability to ensure the reliability and safety of agricultural machinery equipment in service. Aiming at these problems, a preventive group maintenance strategy for in-service agricultural machinery equipment was proposed. Firstly, the fuzzy clustering analysis method was used to classify and grade the failure data of agricultural machinery equipment, and the reliability evaluation model of agricultural machinery equipment based on improved competitive Weibull distribution was established, and the reliability level of agricultural machinery equipment was quantitatively evaluated as well. Secondly, based on the seasonal service characteristics and the economic correlation of agricultural machinery equipment, the algorithm model of preventive group maintenance time interval and maintenance opportunity was given. Finally, considering the relationship between the maintenance personnel and the number of agricultural machinery equipment in service, the algorithm model with the minimum maintenance cost as the goal was established, and the group maintenance plan of agricultural machinery equipment was obtained. Combined with the historical failure data and maintenance cost data of 10 small combine harvesters in a farm in Chongqing, the specific implementation case of group maintenance strategy in the service stage of agricultural machinery equipment was given. The results showed that compared with the traditional post maintenance method, the preventive group maintenance strategy reduced the total maintenance times and the total maintenance cost by 22.37% and 19.11%, respectively, which verified the effectiveness of preventive group maintenance strategy in the service stage of agricultural machinery equipment. The proposed method provided an important reference for the research work of maintenance strategy for agricultural machinery equipment.

**Key words:** agricultural machinery equipment; group maintenance; reliability; maintenance timing; maintenance cost

收稿日期: 2020-08-11 修回日期: 2020-09-12

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51905450)和中央高校基本科研业务费专项资金项目(SWU114038、XDJK2015B008)

**作者简介:** 柳剑(1985—), 男, 讲师, 博士, 主要从事复杂机电产品可靠性研究, E-mail: sword\_19850415@163.com

## 0 引言

维修策略是影响农机装备运行可靠性与维护成本的主要因素。目前,在役农机装备的维修策略研究工作主要面向单个农机装备,且普遍采用事后维修的方式进行。维修效率低、维修时机不合理、维修成本高是农机装备维修环节普遍存在的问题<sup>[1]</sup>。随着现代维修理论与信息技术的不断发展,预防维修<sup>[2]</sup>、视情维修<sup>[3]</sup>等方式逐渐应用到农机装备的服役过程中,使维修环节普遍存在的问题得到一定程度缓解。

农机装备服役的季节性强,作业环境复杂恶劣,且作业任务往往需多台农机装备共同完成,因此在役农机装备具有多设备系统的特征<sup>[4]</sup>。多设备系统存在 4 种相关关系,即时间相关性、故障相关性、结构相关性和功能相关性<sup>[5-6]</sup>。在多设备系统维修决策领域,OKUMOTO 等<sup>[7]</sup>在 1983 年首次提出了最佳成组维修策略的概念;ASSAF 等<sup>[8]</sup>在固定周期检测的条件下对不同系统组件提出了相应的成组维修策略。随后,成组维修方式逐渐被成功应用于重型汽车<sup>[9]</sup>、风电设备<sup>[10]</sup>等各类复杂机械系统中,利用故障或性能退化信息来更新原有维修计划,从而建立动态模型以实现维修决策优化。考虑到多设备系统大多服役于动态变化的环境中,因此文献[11-21]对动态成组维修模型进行了一系列研究,包括在可用度、维修时间、维修资源等约束情况下,对各类相关性模型进行维修决策优化,推进了成组维修策略相关理论的研究。

然而,上述研究主要有两方面不足:①现有研究往往将装备运行故障数据进行单一化处理,并未考虑故障数据是由多个故障机理并存产生的结果,即竞争性故障的客观存在,而不同类型的运行故障对在役农机装备维修决策的影响具有差异性。②由于农机装备服役的非连续季节性特征,使得现有多设备系统成组维修模型的假设条件对在役农机装备并不适用。由于这两方面的不足,导致在役农机装备现有的可靠度、维修时机和维修费用等算法存在较大误差,实用性较差。因此,本文在考虑维修相关性的基础上,提出一种在役农机装备的预防性成组维修策略,以期能够解决在役农机装备可靠性评估结果误差较大和维修经济性较差的问题。

## 1 在役农机装备的可靠性评估

可靠性评估是分析评价农机装备可靠性水平的重要方法,其中威布尔分布是描述零部件与复杂机械系统寿命分布规律的一种最常见分布形式。对于

在役农机装备而言,由于其运行故障数据为非独立同分布的,因此单威布尔模型并不符合其可靠性评估要求。文献[22]基于竞争性故障装备(竞争失效)对竞争威布尔和混合威布尔模型进行了分析,证明了多台高档制造装备的寿命符合竞争威布尔分布。本文通过改进竞争威布尔模型<sup>[23]</sup>和分类等级化运行故障数据,并结合在役农机装备的服役环境与运行工况来评估其可靠性。

### 1.1 运行故障与故障应力

为完整表征在役农机装备的运行故障特性,本文定义了运行故障的故障特征属性和故障应力选择集等概念,并以此建立运行故障与故障应力之间的关系。

农机装备运行故障特征属性的定义如下:在农机装备服役过程中,其故障特征属性是造成运行故障的随机故障事件或最小随机故障事件的集合,用  $F_p$  表示

$$F_p = (f_{p1}, f_{p2}, \dots, f_{pn}) \quad (1)$$

将  $F_p$  作为顶事件,采用故障树 FTA 分析法得到  $n$  个造成  $F_p$  产生的最小割集  $f_{p1}, f_{p2}, \dots, f_{pn}$ 。考虑在役农机装备的服役环境与运行工况等因素,确定其故障应力选择集为:  $S = \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\} = \{\text{工作应力, 内部应力, 工作环境作用应力, 偶然因素, 人为因素}\}$ 。通过故障应力  $s_j$  来确定模糊集合  $S_j, j = 1, 2, \dots, g$ ; 其中  $S_j$  是故障应力  $s_j$  可以激发的故障特征属性集合。定义  $\mu_{s_j}(f_{pi})$  是  $F_p$  的第  $i (i = 1, 2, \dots, n)$  个特征属性  $f_{pi}$  对集合  $S_j$  的隶属度,并据此计算出在役农机装备的模糊故障关系矩阵为

$$\tilde{R}_p = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1g} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2g} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{ng} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中  $r_{ij}$ ——割集  $f_{pi}$  与模糊集合  $S_j$  的模糊隶属度,即  $r_{ij} = \mu_{s_j}(f_{pi})$

设  $g$  个故障应力共同激发一个  $f_{pi}$ ,聘请相关农机装备维修专家逐次对  $g$  个故障应力进行两两比对,评判出两者中最容易激发农机装备运行故障特征属性的故障应力,可能性大者记为一次,得到  $g$  个故障应力各自的出现次数  $t_1, t_2, \dots, t_j, \dots, t_g$ 。依据评判结果计算  $r_{ij}, r_{ij}$  计算公式为

$$r_{ij} = \frac{t_j}{\max_{j=1,2,\dots,g} t_j} \quad (3)$$

### 1.2 故障特征属性权重确定

农机装备运行故障特征属性的权重体现了故障特征属性的重要度以及与该故障产生的关联度<sup>[24]</sup>。

依据表1给出的模糊评判标度来计算模糊故障互补

矩阵  $\tilde{A}$ 。 $\tilde{A}$  表示为

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \cdots & \alpha_{1n} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \cdots & \alpha_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \alpha_{n1} & \alpha_{n2} & \cdots & \alpha_{nn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

表 1 模糊评判标度

Tab. 1 Fuzzy rating scale

| 序号 | $\alpha_i$ 和 $\alpha_j$ 的比较程度 | 标度 $\alpha_{ij}$   |
|----|-------------------------------|--------------------|
| 1  | $i$ 与 $j$ 两属性同等重要             | 0.5                |
| 2  | $i$ 属性比 $j$ 属性稍微重要            | 0.6                |
| 3  | $i$ 属性比 $j$ 属性较重要             | 0.7                |
| 4  | $i$ 属性比 $j$ 属性非常重要            | 0.8                |
| 5  | $i$ 属性比 $j$ 属性绝对重要            | 0.9                |
| 6  | 反比较                           | 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 |

修正模糊故障互补矩阵  $\tilde{A}$ , 使  $\tilde{A}$  满足模糊故障一致矩阵  $\tilde{A}'$  的要求: ①  $\alpha_{ii} = 0.5, i = 1, 2, \dots, n$ 。②  $\alpha_{ij} = 1 - \alpha_{ji}, i, j = 1, 2, \dots, n$ 。③  $\alpha_{ij} = \alpha_{ik} - \alpha_{kj}, i, j, k = 1, 2, \dots, n$ 。通过计算得到  $\tilde{A}'$  为

$$\tilde{A}' = \begin{bmatrix} \bar{\alpha}_{11} & \bar{\alpha}_{12} & \cdots & \bar{\alpha}_{1n} \\ \bar{\alpha}_{21} & \bar{\alpha}_{22} & \cdots & \bar{\alpha}_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \bar{\alpha}_{n1} & \bar{\alpha}_{n2} & \cdots & \bar{\alpha}_{nn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

利用式(5)可得到故障特征属性  $f_{p1}, f_{p2}, \dots, f_{pn}$  的权重为

$$W_p = (w_{p1}, w_{p2}, \dots, w_{pi}, \dots, w_{pn})$$

其中

$$w_{pi} = \beta^{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \bar{\alpha}_{ij}} / \sum_{k=1}^n \beta^{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \bar{\alpha}_{kj}} \quad (6)$$

式中  $\beta$ ——权重分配的分辨率参数

$\bar{\alpha}_{ij}$ ——一致矩阵中属性  $i$  与属性  $j$  相对于该故障模式的重要度标度

同理, 可求得  $l$  台在役农机装备运行故障特征属性  $F_l$  的权重  $W = (w_1, w_2, \dots, w_l)$ 。根据故障特征属性的权重和模糊故障关系矩阵可得到多台在役农机装备全故障模糊综合评判矩阵  $B'$  为

$$B' = WB = W \begin{bmatrix} B_1 & B_2 & \cdots & B_p & \cdots & B_l \end{bmatrix}^T = \begin{matrix} (w_1, w_2, \dots, w_l) \\ \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1g} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2g} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_{l1} & b_{l2} & \cdots & b_{lg} \end{bmatrix} \end{matrix} = \begin{bmatrix} b'_{11} & b'_{12} & \cdots & b'_{1g} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ b'_{l1} & b'_{l2} & \cdots & b'_{lg} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中  $B_p$ ——第  $p$  台在役农机装备单系统故障模糊评判序列

$b'_i$ ——第  $i$  台在役农机装备所有故障对其故

障应力选择集中  $s_i$  的评判值

### 1.3 运行故障数据的分类等级化处理

将运行故障分为 4 个等级, 即  $Z = \{Z_1(\text{致命}), Z_2(\text{严重}), Z_3(\text{一般}), Z_4(\text{轻微})\}$ , 赋予每个故障等级相应的权重。将运行故障影响等级和故障特征属性集合对故障应力的模糊评判结果进行处理分析, 以此作为故障信息序列。在役农机装备全故障模式  $F_p = \{f_{p1}, f_{p2}, \dots, f_{pn}\}$  的故障信息序列  $B''$  为

$$B'' = ZB = Z \begin{bmatrix} B_1 & B_2 & \cdots & B_p & \cdots & B_l \end{bmatrix}^T = Z \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1g} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2g} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_{l1} & b_{l2} & \cdots & b_{lg} \end{bmatrix} \quad (8)$$

### 1.4 改进竞争威布尔模型的可靠性评估模型

通过故障模糊聚类的方法将农机装备的运行故障集归为  $m$  类, 每类运行故障集对应一个相似或相同的且独立作用于在役农机装备的故障机制, 即  $T = \min\{T_1, T_2, \dots, T_m\}$ , 设  $F_i(t)$  是  $T_i$  的累积失效分布函数, 因此可得到多台在役农机装备的累积失效分布函数为

$$1 - F(t) = \exp\left(-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right) \quad (9)$$

式中  $\eta$ ——尺度参数  $\beta$ ——形状参数

其可靠度函数为

$$R(t) = \prod_{i=1}^m (1 - F_i(t)) = \exp\left(-\int_0^t \sum_{i=1}^m \lambda_i(x) dx\right) \quad (10)$$

式中  $\lambda_i(x)$ ——农机装备第  $i$  类故障失效率

根据在役农机装备故障信息相似程度来建立模糊故障相似矩阵  $A = (a_{ij})_{n \times n}$ , 其中  $a_{ij}$  表示故障  $B_i$  与  $B_j$  的相似度, 其计算公式为

$$a_{ij} = \frac{\sum_{m=1}^g |b_{im} - \bar{b}_i| |b_{jm} - \bar{b}_j|}{\sqrt{\sum_{m=1}^g (b_{im} - \bar{b}_i)^2} \sqrt{\sum_{m=1}^g (b_{jm} - \bar{b}_j)^2}} \quad (11)$$

$$\text{其中 } \bar{b}_i = \frac{1}{g} \sum_{m=1}^g b_{im} \quad \bar{b}_j = \frac{1}{g} \sum_{m=1}^g b_{jm}$$

用上述方法建立的模糊故障相似矩阵  $A$  还要求出模糊故障相似矩阵的传递包  $t(A)$ , 应用平方方法逐次求出  $A$  的传递包  $t(A)$ 。 $\bar{A} = t(A)$  是模糊故障等价矩阵, 记  $\bar{A} = (a_{ij}^{(\lambda)})_{n \times n}$ , 取模糊聚类的阈值  $\lambda$ , 利用阈值  $\lambda$  可计算出对应的等价关系矩阵

$$A_\lambda = (a_{ij}^{(\lambda)})_{n \times n}$$

$$\text{其中 } a_{ij}^{(\lambda)} = \begin{cases} 1 & (\bar{a}_{ij} \geq \lambda) \\ 0 & (\bar{a}_{ij} < \lambda) \end{cases}$$

根据  $A_i$  将每列中元素为 1 所对应的  $B$  划为一类, 从而实现了对在役农机装备运行故障时间的模糊聚类分析。

### 1.5 改进竞争威布尔模型的参数估算

利用自助法(Bootstrap)对改进竞争威布尔模型参数进行估算, 其具体步骤如下:

(1) 改进竞争威布尔模型分布函数的线性化。根据改进竞争威布尔失效分布函数式(9), 可得

$$\ln\left(\ln\frac{1}{1-F(t)}\right) = \beta \ln t - \beta \ln \eta \quad (12)$$

令  $y = \ln\left(\ln\frac{1}{1-F(t)}\right)$ ,  $x = \ln t$ ,  $a = -\beta \ln \eta$ ,  $b = \beta$ , 可得到改进竞争威布尔分布的线性化模型为

$$y_i = \hat{a} + \hat{b}x_i + e_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (13)$$

(2) 根据原始数据利用线性化模型式(13)计算出参数  $a$  和  $b$  的估计值为

$$\hat{a} = \bar{y} - \hat{b}\bar{x} \quad (14)$$

$$\hat{b} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (15)$$

(3) 由式(15)得出离差为

$$e_i = y_i - \hat{a} - \hat{b}x_i \quad (16)$$

(4) 以离差  $e_i$  作为初始数据, 应用自助法进行数据再抽样, 生成 500 个自助样本。

(5) 把生成的 500 个自助样本中的离差  $e_i$  分别与相应的  $\hat{y}_i = \hat{a} + \hat{b}x_i$  相加, 生成 500 个自助重复。

(6) 由式(14)、(15)得出每个自助重复中参数  $a$ 、 $b$  的估计值。

(7) 由  $a = -\beta \ln \eta$  和  $b = \beta$ , 计算得  $\beta$ 、 $\eta$  的再抽样分布。

(8) 通过计算可得出参数  $\beta$ 、 $\eta$  的点估计值和区间估计范围。把通过自助法计算出的  $\beta$ 、 $\eta$  代入改进竞争威布尔模型的可靠性评估模型中得到对应可靠度函数。

## 2 预防性成组维修的维修时机与费用模型

本文在给出在役农机装备基于改进竞争威布尔模型可靠度函数算法的条件下, 结合其实际工况、维修度函数和维修人员分配等问题建立以维修时间为变量的维修模型。在总结和借鉴前人研究的基础上, 建立了针对多台在役农机装备的预防性成组维修策略。

### 2.1 基本维修策略

维修策略主要分为事后维修策略和预防性维修策略。事后维修策略由于故障或失效是无法预测

的, 停止工作时会产生严重的经济损失, 并且当产品中一个部件失效时很可能会引起其他部件的二次损坏, 使维修变的更复杂。而预防性维修策略适用于产品出现故障后, 危机人身安全或任务不能正常完成, 造成严重经济损失的情况。考虑到在役农机装备的实际运行工况和与经济性等问题, 本文采用预防性维修策略。

### 2.2 成组维修策略

在设备维修过程中, 各零部件按照自身的维修策略来确定各自最佳维修时间间隔, 由于各零部件的维修时间间隔并不同, 甚至有些时间间隔差距很大, 因此不能根据这些维修间隔来指定维修策略, 否则系统就需要一直停机维修, 而每次停机都会产生维修成本, 所以根据维修相关性, 采用成组维修方式将维修时间间隔进行整合并制定出统一的维修时间, 这样可以大幅度降低维修次数和维修费用。本文借鉴成组维修策略的思想, 将多台在役农机装备视为一个系统, 其中单台农机装备即为该系统的一部分, 对系统可靠性和维修时间间隔进行计算与整合, 并制定相应的预防性成组维修策略。

### 2.3 预防性成组维修策略的假设

在役农机装备维修任务的假设如下:

(1) 工作时间。在役农机装备与其他复杂机械设备的工作时间明显不同, 主要集中服役在作物播种、田间管理以及收获期。因此假设其每季使用时间控制在  $m^*$  个工作日, 每个工作日服役时间按  $n^*$  计算, 在一年用  $i^*$  季的情况下, 其每年工作时间为  $T_a = i^* n^* m^*$ 。

(2) 维修费用。假设单台在役农机装备的固定成本  $c_0$  包含保养、检查等费用;  $c_1$  为全部的人工成本; 每台农机装备出现故障而需要维修的可变成本  $c_2$ ; 每台农机装备在维修期间由于停产造成的单位时间生产损失成本为  $c_3$ 。

(3) 可靠度。假设每台农机装备可靠度函数分布相同或相似, 且多台农机装备的可靠度下降到  $k^*$  时, 对其进行预防性成组维修。

(4) 维修度。维修度是指在可维修的系统中, 在规定的维修条件下, 规定的维修时间内, 将系统恢复到原来运行效能的概率。假设维修度函数为  $M(t)$ , 则每次对多台在役农机装备进行预防性成组维修后, 其可靠度函数与前一次可靠度函数的关系为

$$R(t)_{n+1} = M(t)R(t)_n \quad (17)$$

### 2.4 预防性成组维修策略的维修人员分配与费用

在实际运行过程中, 在役农机装备的台数要远

远多于维修人员的数量,因此维修人员不能一次性对全部机器进行预防性成组维修,所以对维修人员数量和人工成本需要根据实际数据来拟合曲线,确定函数,再进行计算。本文引入 SPSS Pearson<sup>[25]</sup>来解决维修人员数量与人工成本之间的问题。SPSS Pearson 是基于变量理论频数与实际频数吻合程度的检验,提供变量间的关联性分析,具有普遍的统计意义。通过 SPSS Pearson 检验拟合出相应曲线并分析数据统计结果,可以发现维修人员数量与人工成本呈负相关,即随着维修人员人数  $r^*$  增多,维修费用减少,其中拟合曲线为  $c_1 = c(r^*)$ 。

### 2.5 预防性成组维修时间间隔

为保证在役农机装备中大多数机器在实际工况下可正常工作,将其可靠度临界值设为  $k^*$ ,并将可靠度为  $k^*$  的时间点  $t_L$  作为临界时间,以可靠度为 1 到  $k^*$  所对应的时间 0 到  $t^*$  作为预防性成组维修任务时间约束。每一次预防性成组维修后时间从 0 开始重新计算,当可靠度函数起始值不能达到  $k^*$  时,则将时间累加得到可正常工作总时长  $T$ 。为给出在役农机装备的维修费用算法,本文确定第  $L$  次预防性维修时间间隔  $T_L = t_L - t_{L-1}$ 。

### 2.6 预防性成组维修费用模型

以由  $N$  个独立运行且可能发生故障的在役农机装备所构成的系统作为研究对象。令  $N(t)_L$  代表多台在役农机装备进行第  $L$  次预防性成组维修后在时刻  $t$  工作的农机装备的数量 ( $0 \leq N(t)_L \leq N, L = 1, 2, \dots, n$ ),将在役农机装备通过计算整合得到其可靠度函数  $R(t)_L$ ,其中每台在役农机装备为独立同分布。则  $N(t)_L$  的分布为

$$F(t)_L = 1 - R(t)_L \quad (18)$$

因此,在役农机装备群进行第  $L$  次预防性成组维修后在时刻  $t$  工作的设备数量为  $y$  的概率为

$$P[N(t) = y]_L = \binom{N}{y} [1 - F(t)_L]^y [F(t)_L]^{N-y} \quad (19)$$

$N(t)$  的分布为二项分布,其均值为

$$E[N(t)]_L = N[1 - F(t)_L] \quad (20)$$

假设当在役农机装备工作磨损后达到特定可靠度  $k^*$  时,对其进行预防性成组维修,累计分布函数为  $G(t)$ 。第  $L$  个周期预计维修费用  $R_{cL}$  为

$$R_{cL} = c_0 N + c_1 + c_2 N \int_0^{T_L} F(t)_L dG(t) \quad (21)$$

第  $L$  个周期预计生产损失  $P_{cL}$  为

$$P_{cL} = c_3 \int_0^{T_L} [N - E[N(t)]_L] \overline{G(t)} dt \quad (22)$$

其中  $\overline{G(t)} = 1 - G(t)$  (23)

当且仅当  $M(t)R(t)_L \leq k^*$  时,则在役农机装备没有进行预防性成组维修的必要,即处于报废期,因此总预防性成组维修费用为

$$c(G(t)) = \sum_{L=1}^n R_{cL} + \sum_{L=1}^n P_{cL} \quad (24)$$

在役小型联合收获机群可正常工作总时长  $T$  为

$$T = \sum_{L=1}^n T_L \quad (25)$$

## 3 算例分析

本文对重庆市某农场 10 台 4LZ-0.6LA 型小型联合收获机 2015—2019 年的历史故障数据以及成本数据进行收集。根据在役小型收获机的服役环境与运行工况,对其各类运行故障数据进行分析评级,得到 13 类运行故障模式集的故障特征属性与故障影响等级。为体现本文算法的随机性和普遍性,故从收集统计到的运行故障数据中随机抽选 8 个运行故障模式(4 种故障等级中每种选 2 个)进行可靠性分析计算,算例分析结果如下:取故障集为  $F = \{F_1(\text{上割台不能正常升降})、F_2(\text{发动机启动后自动行走})、F_3(\text{割刀往复运动停止})、F_4(\text{刮板严重变形或损坏})、F_5(\text{机身支架或挡板断裂})、F_6(\text{扶禾无力或扶禾器不转动})、F_7(\text{谷物未脱净})、F_8(\text{脱粒盖排草口处农作物损失率过大})\}$ ,其运行故障发生时间  $T = \{t_1(266 \text{ h}), t_2(307 \text{ h}), t_3(404 \text{ h}), t_4(469 \text{ h}), t_5(521 \text{ h}), t_6(593 \text{ h}), t_7(675 \text{ h}), t_8(792 \text{ h})\}$ 。依据本文算法对在役小型收获机群的运行故障模式进行 FTA 分析,得到相应故障特征属性集合,然后通过模糊推理的方法可得到其全系统运行故障对故障应力选择集模糊综合评判模型,计算出运行故障的模糊相似矩阵  $\mathbf{A}$  与相应聚类对象的传递包,从而得到模糊等价矩阵  $\overline{\mathbf{A}}$  为

$$\overline{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} 1.000 & 0.923 & 0.927 & 0.927 & 0.987 & 0.898 & 0.898 & 0.947 \\ 0.923 & 1.000 & 0.923 & 0.923 & 0.923 & 0.898 & 0.898 & 0.923 \\ 0.927 & 0.923 & 1.000 & 0.957 & 0.927 & 0.898 & 0.899 & 0.927 \\ 0.927 & 0.923 & 0.957 & 1.000 & 0.927 & 0.898 & 0.898 & 0.927 \\ 0.987 & 0.923 & 0.927 & 0.927 & 1.000 & 0.898 & 0.898 & 0.947 \\ 0.898 & 0.898 & 0.898 & 0.898 & 0.898 & 1.000 & 0.898 & 0.898 \\ 0.898 & 0.898 & 0.898 & 0.898 & 0.898 & 0.898 & 1.000 & 0.898 \\ 0.947 & 0.923 & 0.927 & 0.927 & 0.947 & 0.898 & 0.898 & 1.000 \end{bmatrix}$$

根据模糊聚类方法,计算聚类阈值  $\lambda$  为 1、0.987 3、0.957 4、0.947 2、0.927 5、0.923 2、0.898 2、0.898 1,并且阈值越大分类数越多。取  $\lambda = 0.923 2$  和  $\lambda = 0.892 8$  进行计算,得到等价关系矩阵为

$$\bar{A}_{0.9232} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\bar{A}_{0.8928} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

表 2 改进竞争威布尔和单威布尔模型参数估计值与区间估计范围

Tab.2 Improving competitive Weibull and single Weibull parameter estimation and interval estimation range

| 置信度  | 改进竞争威布尔模型              |                    |                        |                     | 单威布尔模型                 |                    |
|------|------------------------|--------------------|------------------------|---------------------|------------------------|--------------------|
|      | $\eta_1$               | $\beta_1$          | $\eta_2$               | $\beta_2$           | $\eta$                 | $\beta$            |
| 点估计  | 259.968 8              | 2.622 0            | 330.910 3              | 9.847 6             | 567.190 8              | 2.869 9            |
| 区间估计 | [168.397 4, 324.562 1] | [1.827 6, 3.421 7] | [289.278 3, 372.167 2] | [7.917 6, 11.028 7] | [482.210 9, 612.343 3] | [1.927 7, 3.672 1] |

其平均无故障间隔时间(MTBF)为

$$t_{MTBF} = \int_0^{\infty} t f(t) dt = 211.711 \text{ h}$$

考虑到小型收获机竞争性故障的客观存在、不同运行故障对小型收获机影响程度的差异性和“实际使用用户的可靠感受明显低于评估结果”的现象,本文提出的改进竞争威布尔模型的可靠度计算结果更符合实际情况。

将维修人员分配与维修费用的统计分析数据输入 SPSS Pearson 中,通过 SPSS Pearson 检验分析数据统计结果并拟合出维修人员数量与人工成本之间的相关曲线  $c(r^*)$  为

$$c_1 = c(r^*) = 200N + 100 \frac{N^2}{r^*}$$

通过对企业调研与用户走访,已知  $N = 10$ ,  $c_0 = 100$  元,  $r^* = 4$ ,  $\mu = 1$ ,  $c_2 = 200$  元,  $c_3 = 300$  元,  $T_n = 320 \text{ h}$ ,  $M(t) = 0.9$ ,  $k^* = 0.7$ 。根据多台在役小型收获机的可靠度函数可得到  $T_1 = 367.5 \text{ h}$ ,代入式(21)可得第 1 个周期预防性成组维修策略的预计费用为

$$R_{c1} = c_0N + c_1 + c_2N \int_0^{T_1} F(t)_1 dG(t) \approx 5500 \text{ 元}$$

第 1 个周期的预计生产损失为

$$P_{c1} = c_3 \int_0^{T_1} [N - E[N(t)]_1] \overline{G(t)} dt \approx 0 \text{ 元}$$

由此可以将故障数据集分为  $\{t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_8\}$ 、 $\{t_6\}$ 、 $\{t_7\}$  3 类和  $\{t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_8\}$ 、 $\{t_6, t_7\}$  2 类,考虑到计算时需要对小样本数据进行处理的要求,故选择  $\lambda = 0.8982$  作为运行故障数据集的聚类结果,即取  $\lambda = 0.8982$  的聚类结果作为改进竞争威布尔模型中 2 个独立分布的使用故障数据。由自助法可以得出参数  $\eta_1, \beta_1$  与  $\eta_2, \beta_2$  的点估计和区间范围,如表 2 所示。

基于改进竞争威布尔模型,多台在役小型收获机的故障率函数为

$$\lambda(t) = \lambda_1(t) + \lambda_2(t) = \frac{\beta_1}{\eta_1^{\beta_1}} t^{\beta_1-1} + \frac{\beta_2}{\eta_2^{\beta_2}} t^{\beta_2-1} =$$

$$1.2210 \times 10^{-6} t^{1.6220} + 1.3606 \times 10^{-24} t^{8.8476}$$

其可靠度函数为

$$R(t) =$$

$$\exp(-4.6567 \times 10^{-7} t^{2.6660} - 1.5378 \times 10^{-25} t^{9.8476})$$

当  $M(t) = 0.9$  时,代入式(17)可得  $R(t)_2 = 0.9R(t)_1$ ,再计算出预防性成组维修策略第 2 个周期的可靠度函数。根据多台在役小型收获机的可靠度函数可得到  $T_2 = 327 \text{ h}$ ,代入式(21)可得第 2 个周期预防性成组维修策略的预计费用为

$$R_{c2} = c_0N + c_1 + c_2N \int_0^{T_2} F(t)_2 dG(t) \approx 5700 \text{ 元}$$

$$P_{c2} = c_3 \int_0^{T_2} [N - E[N(t)]_2] \overline{G(t)} dt \approx 30 \text{ 元}$$

同理,可分别求出第 3、4 个周期预防性成组维修策略的预计费用为  $R_{c3} = 5880$  元,  $P_{c3} = 57$  元,  $R_{c4} = 6042$  元,  $P_{c4} = 81.3$  元。

当在役小型收获机进入第 5 个运行周期时,可求出  $R(t)_5 = 0.67$ ,即  $R(t)_5 \leq k^*$ 。此时,在役小型收获机没有进行预防性成组维修的必要,即处于报废期。最终将计算结果代入式(24)与式(25),则 10 台在役小型收获机的总预防性成组维修费用和总工作时长分别为

$$c(G(t)) = \sum_{L=1}^n R_{cL} + \sum_{L=1}^n P_{cL} = 23290.3 \text{ 元}$$

$$T = \sum_{L=1}^n T_L = 1130.5 \text{ h}$$

随着多台在役小型收获机预防性成组维修次数增加,其可靠度逐渐下降,正常工作周期时间长度逐

渐缩短,而预计生产损失逐渐增加。对农机企业与农民用户有关事后维修策略的维修费用和生产损失数据进行调查,10台小型收获机的总维修成本(包括生产损失和维修费用)保守估计为30000元左右,对比预防性成组维修总费用金额为23290.3元,将总维修费用降低了22.37%,同时也保证了小型收获机的运行可靠性。

为了验证预防性成组维修策略在农机装备服役阶段应用的有效性,同样选择本算例中的历史故障数据,即在役小型收获机具有相同的可靠度函数。根据实际情况,对预防性成组维修技术参数进行调整,如考虑在农忙时段维修人员数量可能不足,维修成本可能增加等情况,因此假设 $N=10$ ,  $c_0=120$ 元,  $r^*=2$ ,  $\mu=1$ ,  $c_2=250$ 元,  $c_3=400$ 元,  $T_a=320$ h,  $M(t)=0.9$ ,  $k^*=0.7$ 。同样采用本文提出的预防性成组维修策略对10台在役小型收获机进行维修,在保证小型收获机运行可靠性的前提下,最终得到其预防性成组维修的总费用为24267.6元,与事后维修策略的总维修费用相比降低了19.11%,总工作时长为1085.3h。

## 4 结论

(1)通过引入故障特征属性与故障信息序列来

解决单一化处理运行故障数据所造成的计算结果不准确的问题。而对运行故障数据进行等级化处理,解决了不同运行故障对在役农机装备影响程度的差异性,更符合实际情况。

(2)对事后维修和预防性维修进行讨论,借鉴维修相关性与成组维修策略的思想,提出了对在役农机装备的预防性成组维修策略。在预防性成组维修策略中给出维修时机,维修时间间隔和维修费用的算法,并在算法中考虑了维修度和维修人员数量对预防性成组维修策略的影响。通过2个案例分析表明,本文提出的在役农机装备预防性成组维修策略对比传统的事后维修方式,改善了维修过程中效率低、时机无规律等问题,总维修费用分别降低了22.37%与19.11%,更具有操作性和有效性。

(3)本文未涉及预防性成组维修策略中维修度、维修费用、维修人员数量等维修参数对总维修费用、总工作时长等指标的敏感性分析,也未讨论不同可靠度阈值 $k^*$ 下维修时机,维修时间间隔和总维修费用的变化规律,因此下一步工作需继续深入研究和完善在役农机装备的预防性成组维修模型,从而支撑我国农机装备维修制度的规范化发展。

## 参 考 文 献

- [1] 王万章,段铁城. 农业机械定周期维修的可靠性边界条件维修周期的数学模型[J]. 农业机械学报, 2003, 34(3): 62-64.  
WANG Wanzhang, DUAN Tiecheng. Study on reliability boundary conditions for periodic maintenance of agricultural machinery [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003, 34(3): 62-64. (in Chinese)
- [2] 何庆. 预防维修周期的数学模型[J]. 农业机械学报, 2005, 36(2): 153-154.
- [3] 郑文钟,陈开考,何勇. 视情维修制拖拉机合理更新期计算方法的研究[J]. 农业机械学报, 2003, 34(4): 63-65.  
ZHENG Wenzhong, CHEN Kaikao, HE Yong. Study on calculation methods of rational renewal cycle of tractors [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003, 34(4): 63-65. (in Chinese)
- [4] THOMAS L. A survey of maintenance and replacement models for maintainability and reliability of multi-item system [J]. Reliability Engineering, 1986, 16(4): 297-309.
- [5] 杨元,黎放,侯重远,等. 基于相关性的多部件系统机会成组维修优化[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(4): 827-832.  
YANG Yuan, LI Fang, HOU Chongyuan, et al. Opportunistic group maintenance optimization of multi-unit system under dependence [J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2012, 18(4): 827-832. (in Chinese)
- [6] 徐孙庆,耿俊豹,魏曙震,等. 考虑相关性的串联系统动态机会成组维修优化[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(6): 1411-1416.  
XU Sunqing, GENG Junbao, WEI Shuhuan, et al. Dynamic opportunistic grouping maintenance optimization for series system considering dependencies [J]. Systems Engineering and Electronics, 2018, 40(6): 1411-1416. (in Chinese)
- [7] OKUMOTO K, ELSAYED E A. An optimum group maintenance policy [J]. Naval Research Logistics Quarterly, 1983, 30(4): 667-674.
- [8] ASSAF D, SHANTHIKUMAR J G. Optimal group maintenance policies with continuous and periodic inspections [J]. Management Science, 1987, 33(11): 1440-1452.
- [9] BOUVARD K, ARTUS S, BÉRENGUER C, et al. Condition-based dynamic maintenance operations planning and grouping. Application to commercial heavy vehicles [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2011, 96(6): 601-610.
- [10] SHAFIEE M, FINKELSTEIN M. A proactive group maintenance policy for continuously monitored deteriorating systems: application to offshore wind turbines [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part O: Journal of Risk and Reliability, 2015, 229(5): 373-384.
- [11] HORENBEEK A V, PINTELON L. A dynamic predictive maintenance policy for complex multi-component systems [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2013, 120(12): 39-50.
- [12] VAN P D, HAI C V, BARROS A, et al. Grouping maintenance strategy with availability constraint under limited repairmen [J]. IFAC Proceeding Volumes, 2012, 45(20): 486-491.
- [13] HAI C V, VAN P D, BARROS A, et al. Dynamic grouping maintenance for complex structure systems with non-negligible replacement time [J]. IFAC Proceeding Volumes, 2012, 45(31): 79-84.

- [23] MA X, HOVY E. End-to-end sequence labeling via bi-directional LSTM – CNNs – CRF[C]//Proceedings of the 54th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (Volume 1: Long Papers). Berlin, Germany: Association for Computational Linguistics, 2016: 1064 – 1074.
- [24] CROSS J, HUANG L. Incremental parsing with minimal features using bi-directional LSTM[C]//Proceedings of the 54th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (Volume 2: Short Papers). Berlin, Germany: Association for Computational Linguistics, 2016: 32 – 37.
- [25] YAO Y, HUANG Z. Bi-directional LSTM recurrent neural network for Chinese word segmentation[M]//HIROSE A, OZAWA S, DOYA K, et al. Neural information processing. Cham: Springer International Publishing, 2016: 345 – 353.
- [26] RUI Z, RUQIANG Y, JINJIANG W, et al. Learning to monitor machine health with convolutional bi-directional LSTM networks[J]. Sensors, 2017, 17(2):273.
- [27] 张冲. 基于 Attention – Based LSTM 模型的文本分类技术的研究[D]. 南京:南京大学, 2016.
- [28] CHURCH K W. Word2Vec[J]. Natural Language Engineering, 2017, 23(1):155 – 162.
- [29] WOLF L, HANANI Y, BAR K, et al. Joint word2vec networks for bilingual semantic representations[J]. International Journal of Computational Linguistics and Applications, 2014, 5(1):27 – 42.
- [30] ZHANG D, XU H, SU Z, et al. Chinese comments sentiment classification based on word2vec and SVMperf[J]. Expert Systems with Applications, 2015, 42(4): 1857 – 1863.
- [31] GERS F A, SCHMIDHUBER J, CUMMINS F. Learning to forget: continual prediction with LSTM[J]. Neural Computation, 2000, 12(10):2451 – 2471.
- [32] SHI X, CHEN Z, WANG H, et al. Convolutional LSTM network: a machine learning approach for precipitation nowcasting [M]//CORTEZ C, LAWRENCE N D, LEE D D, et al. Advances in neural information processing systems 28. Curran Associates, Inc, 2015: 802 – 810.
- [33] GERS F A, SCHMIDHUBER E. LSTM recurrent networks learn simple context-free and context-sensitive languages[J]. IEEE Trans. Neural Netw., 2001, 12(6):1333 – 1340.

(上接第 322 页)

- [14] VAN P D, BARROS A, BÉRENGUER C, et al. Dynamic grouping maintenance with time limited opportunities [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2013, 120(12): 51 – 59.
- [15] 苏春, 陈武. 基于滚动窗口方法的风力机动态机会维修优化[J]. 机械工程学报, 2014, 50(14): 62 – 68.  
SU Chun, CHEN Wu. Dynamic opportunistic maintenance optimization for wind turbine system based on rolling horizon approach[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(14): 62 – 68. (in Chinese)
- [16] DO P, VU H C, BARROS A, et al. Maintenance grouping for multi-component systems with availability constraints and limited maintenance teams[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2015, 142(10): 56 – 67.
- [17] HAI C V, DO P, BARROS A, et al. Maintenance planning and dynamic grouping for multi-component systems with positive and negative economic dependencies[J]. IMA Journal of management Mathematics, 2015, 23(2): 145 – 170.
- [18] GENG J, AZARIAN M, PECHT M. Opportunistic maintenance for multi-component systems considering structural dependence and economic dependence[J]. System Engineering and Electronics, 2015, 16(3): 493 – 501.
- [19] DO P, VU H C, BARROS A, et al. Opportunistic maintenance based on multi-dependent components of manufacturing system [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2016, 65(1): 401 – 404.
- [20] HAI C V, DO P, BARROS A. A stationary grouping maintenance strategy using mean residual life and the Birnbaum importance measure for complex structures[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2016, 65(1): 217 – 234.
- [21] 苏春, 陈武. 考虑部件经济相关性的风力机系统状态维修优化[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2016, 46(5): 1007 – 1012.  
SU Chun, CHEN Wu. Optimization of condition based maintenance for wind turbine system considering economic dependence among components[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2016, 46(5): 1007 – 1012. (in Chinese)
- [22] 张根保, 郭书恒. 基于竞争威布尔模型的加工中心可靠性评估[J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21(1): 180 – 186.  
ZHANG Genbao, GUO Shuheng. Reliability evaluation of machining tool center based on competing Weibull model[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2015, 21(1): 180 – 186. (in Chinese)
- [23] 魏泉, 岳高峰, 柳剑, 等. 基于改进竞争威布尔模型的联合收割机可靠性评估研究[J]. 农机化研究, 2019, 41(3): 13 – 20.  
WEI Xiao, YUE Gaofeng, LIU Jian, et al. Research on reliability evaluation of combine harvester based on improved competitive Weibull model[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(3): 13 – 20. (in Chinese)
- [24] 胡文泽, 何珂, 金诚谦, 等. 基于模糊综合评判的农业机械 FMECA 方法研究[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊): 332 – 337.  
HU Wenzhe, HE Ke, JIN Chengqian, et al. FMECA method based on fuzzy comprehensive evaluation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 332 – 337. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=2018s044&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2018s044&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.044. (in Chinese)
- [25] 徐浩, 张韬, 李晓松, 等. Logistic 回归中不同 Pearson 残差估计方法的探讨[J]. 四川大学学报(医学版), 2015, 46(1): 129 – 132.  
XU Hao, ZHANG Tao, LI Xiaosong, et al. Calculating Pearson residual in Logistic regressions: a comparison between SPSS and SAS[J]. Journal of Sichuan University (Medical Science Edition), 2015, 46(1): 129 – 132. (in Chinese)