

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.S2.008

# 基于任务多样性的农机装备维修策略研究

柳 剑 王世友 李巧菲

(西南大学工程技术学院, 重庆 400715)

**摘要:** 目前农机装备维修策略的研究主要以装备故障数据或退化数据为依据, 往往无法保证装备在某一具体作业过程中的任务成功性, 从而很难满足现代农业对农机装备高任务完成度的要求。针对这一问题, 提出了一种基于任务多样性的农机装备维修策略。首先, 根据农机装备在具体作业过程中多阶段任务的特征, 分析了农机装备各系统退化状态与装备任务可靠性之间的关联关系, 建立了农机装备任务可靠性评估模型; 其次, 利用蒙特卡罗法模拟农机装备实际作业情况, 给出了农机装备任务可靠性的综合评估流程, 并对多作业任务下的农机装备任务可靠性进行量化描述; 再次, 基于农机装备任务可靠性和维修成本的关联性, 以最低可靠度和最低维修成本为约束条件, 得到了装备各系统的最佳维修不等周期和最优维修次数; 最后, 引入机会维修策略, 建立了农机装备的维修优化模型, 并根据最佳机会维修阈值确定农机装备最优维修计划安排。以国产某轮式拖拉机的历史故障数据和维修成本数据为例, 确定了该拖拉机故障率较高的4个子系统以及2个作业任务剖面, 在整机可靠度阈值为0.8的情况下, 得到了不同机会维修阈值下的最优维修费用分布情况。当最佳维修阈值为8 h时, 维修成本最低, 为2 587元, 通过与农机装备传统维修策略相比, 总维修费用降低了30.4%。

**关键词:** 农机装备; 任务可靠性; 机会维修; 维修成本

中图分类号: TH17; S220.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)S2-0069-06

## Maintenance Strategy of Agricultural Machinery Equipment Based on Task Variety

LIU Jian WANG Shiyu LI Qiaofei

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

**Abstract:** The current research on the maintenance strategy of agricultural equipment is mainly based on equipment failure data and degradation, which often cannot guarantee the task success of the equipment in a specific operation process, thus making it difficult to meet the requirements of modern agriculture for high task completion of agricultural equipment. To address this problem, a task-based maintenance strategy for agricultural machinery and equipment was proposed. Firstly, based on the correlation between the degradation state of each system of agricultural equipment and the task reliability of the equipment, an assessment model of the task reliability of agricultural equipment was established. Secondly, using the Monte Carlo method, a comprehensive assessment process of the task reliability of agricultural equipment was given, and the task reliability of agricultural equipment under multiple operational tasks was described quantitatively. Then, based on the correlation between the task reliability of agricultural equipment and the maintenance cost, an algorithmic model of the optimal maintenance inequality cycle and optimal maintenance times for each system, which met the constraints of minimum reliability and minimum maintenance cost, was established. Finally, an opportunity maintenance strategy was adopted to establish a maintenance optimization model for agricultural equipment. Taking the historical fault data and maintenance cost data of domestic wheel tractors as examples, the optimal maintenance schedule arrangement based on the optimal opportunity maintenance threshold was obtained. When the optimal maintenance threshold was 8 h, the maintenance cost was 2 587 yuan. Compared with the traditional maintenance strategy of agricultural machinery equipment, the total maintenance cost was reduced by 30.4%. The proposed method was helpful to improve the task completion rate of agricultural machinery equipment, reduce the failure rate and maintenance loss of agricultural machinery equipment.

**Key words:** agricultural machinery equipment; mission reliability; opportunity maintenance; maintenance costs

收稿日期: 2022-06-30 修回日期: 2022-08-15

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(SWU114038、XDJK2015B008)

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

## 0 引言

装备维修策略是农机装备有效运行的重要保障。然而,当前农机装备维修策略往往是从保证装备完好性的角度出发,未考虑农机装备在不同作业任务中所表现出来的差异,忽视了装备工作任务的多样性、复杂性以及维修对装备自身状态的影响,不符合装备运行的实际情况<sup>[1]</sup>。因此,在农业生产过程中亟需制订合理的装备维修策略。

维修策略是指针对装备发生故障的维护策略,有效的维护策略可以减少装备在运行过程中的停机时间和维护成本<sup>[2]</sup>。然而传统的事后维修模式已经不再适合当前日益智能化、复杂化的农机装备。目前维修策略的研究主要以预防性维修为主,主要分为视情维修与周期性维修2类。视情维修<sup>[3]</sup>更多的是基于装备自身退化状态来建立装备维修策略,这种方法无疑忽略来自作业任务的要求和限制,且缺乏实用性。周期性维修则是基于装备运行时间建立装备的最佳预防性维修周期,这种方法在实际生产中被广泛使用<sup>[4]</sup>。以上维修策略主要针对单系统装备而言,而农机装备结构复杂,上述维修策略易造成维修过剩的现象,增加不必要的维修成本。

此外,农机装备的可靠性理论研究鲜有考虑装备作业任务对可靠性的影响,但事实上大部分的农机装备在其全寿命周期里具有“一机多用”的功能特点,不同的作业任务对装备可靠性的影响差异不可忽视,因此对农机装备进行维修策略研究时应结合农机装备自身的作业特点,重视装备作业任务对可靠性的影响,从而以任务可靠性为目标制订适合于农机装备的维修策略。近年来国内外学者对武器装备的任务可靠性进行了大量研究<sup>[5-7]</sup>。随着各领域设备集成度和复杂性的提高,设备功能日益多样化,只考虑单一任务剖面的任务可靠性模型与实际情况并不相符<sup>[8]</sup>,因此考虑到不同任务条件下装备任务可靠性的差异,文献<sup>[9-16]</sup>对多阶段任务系统的可靠性进行了一系列的研究。在维修策略方面,文献<sup>[17]</sup>考虑多任务情形,将维修人员雇用费用分为固定费用和可变费用,以整个任务阶段的总维修费用最小为优化目标,建立了选择性维修决策模型。文献<sup>[18]</sup>针对系统连续执行多个任务的情形,建立了考虑组件运行时间和任务持续时间均不确定情况下的选择性维修决策模型。

当装备中某系统发生故障时,通过对其他系统的可靠性水平进行分析,从而在维修该系统故障的同时对其他相关系统进行机会维修称为机会维修策略<sup>[19]</sup>。机会维修策略能够使装备的若干个维修任

务共享同一次的维修投入和维修时机,从而最大程度地降低装备的维修成本以及维修时间,因此具有重要的应用价值。本文根据机会维修策略的思想,提出一种基于任务多样性的农机装备维修模型。以农机装备的任务可靠性为约束,总维修费用最低为目标,得到最佳机会维修阈值,在一定的任务可靠性阈值下安排农机装备最优维修计划。

## 1 农机装备的任务可靠性评估模型

农机装备的任务可靠性是指装备在特定任务剖面内完成规定功能的能力,通常用任务可靠度或致命性故障间隔任务时间来度量,它被认为是装备在任务期间故障规律的一种描述。本文基于农机装备各系统退化状态与装备任务可靠性之间的关联关系,通过构建不同作业剖面下的可靠性框图来建立任务可靠性模型,并采用蒙特卡罗法对农机装备的多任务状态进行随机抽样模拟,最终给出多作业任务下的农机装备任务可靠性综合评估流程。

### 1.1 农机装备任务多样性描述

农机装备的智能化与复杂化使其功能越来越多样化,在不同的任务需求下农机装备进行不同的作业任务。为更形象地表达农机装备的任务多样性,把农机装备作业剖面定义为完成某一特定作业任务而绘制的农机装备行程图形,将其作为农机装备任务可靠性评估的重要依据。对农机装备在其全寿命周期内的作业剖面按照作业任务的环境及功能不同进行分析,从而得到不同的作业剖面。各作业剖面以基地为原点,由若干任务段组成,在每个任务段上,一般考虑运行速度、运载载荷、作业时间等。以全寿命周期内主要完成2类农业生产(分别为翻地作业、植保作业)的某型拖拉机为例,对拖拉机的多阶段任务展开描述,其中某一次作业剖面简图如图1所示。在拖拉机的具体作业期间,整个作业过程需要依次完成“启动、空载、运输农机具、作业、回程”5个阶段的任务,即在一个特定的作业剖面下,农机装备任务成功的逻辑关系为一个串联序列关系。在实际的农业生产过程中,由于拖拉机在各任务阶段的运行速度、运载载荷、主要故障发生原因的不同,因此还需结合具体作业剖面的实际情况分别

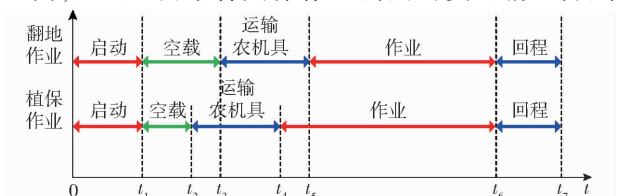


图1 拖拉机多阶段任务作业剖面

Fig. 1 Tractor's multi-stage operation profile

对“启动、空载、运输农机具、作业、回程”5个任务阶段进行具体分析。

## 1.2 农机装备任务可靠性模型

可靠性模型由可靠性框图和数学模型构成。可靠性框图表示装备及其组成子系统单元之间的故障逻辑关系,由代表产品或功能的方框、连线和节点组成。可靠性数学模型用于表达各子系统单元的可靠性与装备可靠性之间的函数关系。建立农机装备的可靠性框图更能直观地描述装备各子系统之间的逻辑关系以及实际工作的情况,是建立农机装备任务可靠性模型的重要环节。首先对农机装备进行系统地功能结构分解,即通过确定农机装备的总体功能,同时分解出与各级子功能相关的子系统组成。一般情况下,可采用逻辑演绎法逐级地将装备的总功能分解为若干子功能。建立农机装备的可靠性模型是农机装备可靠性分析的前提,而可靠性模型包括可靠性结构模型及其对应的数学模型,不同的结构模型对应不同的数学模型。只有在建立了农机装备的可靠性模型之后,才能从各子系统的可靠性入手,定量地分析不同任务阶段下农机装备的可靠性水平,从而对整个农机装备的任务可靠性进行评估。常见的任务可靠性模型有串联、并联、混联3种形式,如表1所示。

表1 装备任务可靠性模型

Tab.1 Task reliability model of equipment

类型	特点
串联模型	由串行连接的 $n$ 个子系统组成,任意一种故障都会导致整个装备的故障
并联模型	以并行连接的 $n$ 个子系统组成,单个系统的故障不会导致整个任务阶段的故障,但会降低装备的运行效率
混联模型	没有特定的构成形式,不以单纯的串联和并联的方式连接

其中,串联模型的可靠度函数为

$$R_s(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad (1)$$

并联模型的可靠度函数为

$$R_s(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i(t)) \quad (2)$$

混联模型的可靠度函数为

$$R_s(t) = \sum_{j=0}^m C_n^j R_i^j(t) (1 - R_i(t))^{n-j} \quad (3)$$

式中  $R_i(t)$ ——第  $i$  个子系统可靠度模型

$R_s(t)$ ——装备任务可靠度模型

$n$ ——装备中子系统总数

$m$ ——发生故障的子系统数

$C$ ——组合运算符

在对农机装备进行系统功能分解,建立可靠性框图的同时,需注意装备的不同单元分属不同类型,如电子单元、机械单元等。这些单元往往服从不同的寿命分布模型,如指数分布、应力强度分布、威布尔分布等。由于威布尔分布能够较好地拟合复杂机械装备的寿命分布规律,故本文假设所研究的农机装备各子系统的基本故障函数服从威布尔分布。

## 1.3 任务可靠性仿真分析

蒙特卡罗仿真方法是基于概率论中的大数定律,利用仿真模型进行大量的统计试验,进而得到统计特征值作为待解问题的数值解的随机抽样统计方法。根据本文对农机装备各子系统服从威布尔分布的假设,各子系统单元发生故障的概率是随机的,其故障发生时间可以用随机变量来描述。在试验中,对装备的各个单元失效时间依据其故障分布函数随机抽取失效时间,通过系统任务可靠性模型计算,求解该次试验整个系统的致命性故障时间,与装备的任务时间进行对比分析,判断任务是否成功。对试验流程累计重复分析,模拟农机装备实际作业情况,通过对结果的拟合给出装备的任务可靠性模型。农机装备任务可靠性蒙特卡罗仿真的步骤如下:

(1)数据输入。确定不同作业任务下农机装备的任务可靠性模型,以及单元失效分布参数、仿真总次数  $K$ 、分析时间  $T$ (装备的作业时间,依据装备的故障数据确定),分析步长  $k$ 。

(2)初始数据设定。初始作业时间设为  $T=0$ 。

(3)依照作业剖面的工作概率,对装备的作业剖面进行随机抽样,得到任务可靠性模型。

(4)产生威布尔分布随机数  $\zeta$ ,对装备各系统的工作状态进行随机模拟,将数据代入可靠性模型中,求解得到装备的剩余寿命  $T'$ 。

(5)比较  $T'$ 和  $T$ 的大小,当  $T' > T$ 时,将装备完成规定作业任务的次数  $S$ 加1。

(6)重复步骤(2)~(5)  $k$ 次,计算农机装备的任务可靠度为  $R_m = S/K$ 。

## 2 农机装备机会维修模型

为提高农机装备的可靠性和工作效率,需做好装备的维修保障工作。根据作业时装备的实际运行情况和外界因素安排有效的维修计划,其关键性问题是确定科学有效的维修周期,避免因维修周期的不合理而影响装备的运行效率和维修成本。以农机装备的任务可靠性阈值为约束,通过二分法求得相应时刻各子系统的最低可靠度。以系统的维修活动为控制量,对农机装备采取机会维修策略。对最佳机会维修阈值进行求解,从而制订以维修成本最小为目

标的维修计划,实现从底层控制顶层的维修优化。

## 2.1 维修效果

农机装备在其作业剖面下的可靠性框图大多为串联模型,即意味着在单个系统发生故障的情况下,整个装备都将停止工作。因此,应该对出现故障的子系统采取正确的维修措施,保持装备的正常运行状态。在维修决策中,对维修活动最常见也是最简单的假设方法是对故障部件进行“完全”维修,即在系统故障或需要进行预防性维修时,对故障部件进

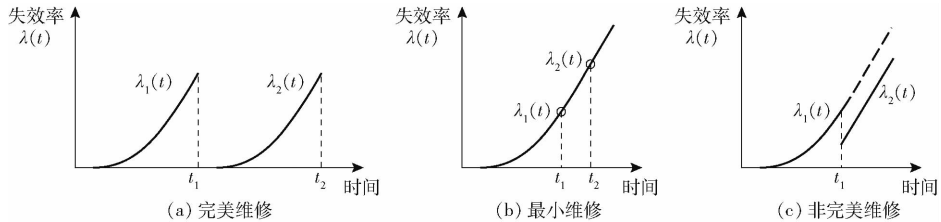


图2 维修活动的维修效果

Fig. 2 Repair effects of each repair method

## 2.2 维修模型的假设

以农机装备的任务可靠性为约束,以子系统的维修活动为控制量,建立从底层控制顶层的维修。结合装备的任务可靠性模型,设定任务可靠性阈值进行维修建模,提出下列假设:

(1)假设子系统在规划时间开始时为全新状态,且各子系统的故障率服从威布尔分布;子系统处于不间断的工作状态,农机装备状态处于连续退化,装备的退化相互独立,且服从同样的威布尔分布。

(2)农机装备进行机会维修可以分为完美维修和不完美维修。

(3)维修需要的资源充足,维修时间忽略不计,但是进行维修时会有停机损失。

## 2.3 各系统的最佳维修周期

农机装备子系统在各维修周期中都可能随机地发生故障,故障发生的次数与故障的分布以及故障率有关,本文假设各系统的故障分布为服从两参数的威布尔分布,其故障率函数为

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1} \quad (4)$$

式中  $\beta$ ——威布尔分布的形状参数

$\eta$ ——威布尔分布的尺度参数

可求得系统在所有  $N$  个维修周期内发生故障的总次数

$$Z = \sum_{i=1}^N \int_0^{T_i} \lambda_i(t) dt \quad (5)$$

式中  $\lambda_i(t)$ ——第  $i$  个维修周期内的故障率函数

$T_i$ ——第  $i$  个维修周期内的作业时间

通过对农机装备在其全寿命周期内各种作业剖面所占的作业时间进行统计分析,结合实际作业,记

行全新更换,以使部件“恢复如新”。但这无疑与实际维修情形差距甚大。目前装备的维修活动可分为3种(如图2所示):完美维修,即采取维修措施后系统运行状态恢复到全新的初始状态,也称为“修复如新”;最小维修,即部件经过维修后其性能恢复到故障前的状态,而不影响系统实际劣化状态,也称“修复如旧”;非完美维修,指部件经过维修后其性能、劣化状态介于完美维修与最小维修之间,这通常认为是可靠性和维理论的一个重大突破<sup>[20]</sup>。

各作业剖面的运行概率为  $\psi_i$ ,可得农机装备在全寿命周期内的任务可靠度为

$$R = \sum_{i=1}^n \psi_i R_i \quad (6)$$

通过式(6)可求得给定任务可靠度阈值下装备各系统的最低可靠度  $R_i^*$ 。根据

$$\exp\left(-\int_0^{T_1} h_1(t) dt\right) = \exp\left(-\int_0^{T_2} h_2(t) dt\right) = \dots = \exp\left(-\int_0^{T_i} h_i(t) dt\right) = R_i^* \quad (7)$$

可求得系统在装备可靠度阈值下的不等维修周期  $T_i$ 。

## 2.4 各系统的最佳维修次数

为综合考虑各系统进行预防维修时役龄回退和老化耗损等因素的影响,本节采用役龄回退因子  $a_k$  和故障率递增因子  $b_k$ ,对不完美维修后的各系统可靠性进行描述,得到子系统第  $i$  个预防维修周期内的故障率函数为

$$\varphi_i(t) = \left( \prod_{k=1}^{i-1} b_k \right) \varphi\left(t + \sum_{k=1}^{i-1} (1-a_k)t_k\right) \quad (8)$$

式中  $\varphi(\cdot)$ ——第  $i-1$  个预防维修周期内的故障率函数

通过对农机装备的历史失效数据可推断得到役龄回退因子  $a_k$  和故障率递增因子  $b_k$  的取值,通过式(8)可对各系统在其不等预防维修周期内的故障次数进行求解。

系统在  $N+1$  次维修后需要进行更换,其生命周期的维护成本率为

$$C_e = \frac{\sum_{i=1}^N C_{pa} n_i + NC_{pj} + C_{pg}}{\sum_{i=1}^N T_i + Nt_j} \quad (9)$$

式中  $C_{px}$ ——小修费用  
 $C_{pj}$ ——预防维修的费用  
 $C_{pg}$ ——系统更换的费用  
 $n_i$ ——第  $i$  个维修间隔中的有效故障数  
 $t_j$ ——第  $j$  次维修的时间

$t_{pi}$ ——系统  $p$  第  $i$  个任务周期内的故障时刻  
 $\lambda_{pip}(t)$ ——系统  $p$  在第  $i_p$  个维修周期后的故障率  
 $Y(p, t_i)$ ——系统  $p$  在  $t_i$  时刻应采取的维修方式

通过最小化  $C_c$  即可获得系统的最佳维修次数  $N$ 。

其中  $Y(p, t_i)$  取 0 表示不维修, 1 表示机会维修, 2 表示更换。

## 2.5 机会维修费用模型

为分析农机装备各系统间维修的经济相关性, 获得最佳机会维修阈值, 以系统维修总费用最少进行优化建模, 即

### 2.5.1 机会维修

$$\min C = \sum_{p=1}^n \sum_{k=1}^w C_{pk} \quad (12)$$

机会维修策略考虑了小部件维修、预防性维护、定期更换和机会性维修, 根据 2.4 节中得到的各系统最佳维修间隔和维修次数, 如果农机装备任一系统在维修间隔内独立发生故障, 则进行最小数量的维修。系统  $p$  是否需要维修, 取决于系统  $p$  在时间  $t_i + \Delta t$  的可靠性或效率是否达到其最小值。如果达到, 系统  $p$  同时被维修, 系统  $p$  的维修次数被加到 1。如果系统  $p$  的预防性维修次数达到  $N_p$ , 装备在更换系统  $p$  并进行装备维修后继续运行。当下一个系统维修到达时刻, 再确定其他系统是否需要维修, 直到装备运行寿命结束。当每个系统达到其各自的预防性维修数量  $N_i$  时, 在  $N_{i+1}$  次维修时进行更换<sup>[21]</sup>。通过找到最佳的机会维修阈值  $\Delta t$ , 可使整个农机装备以维修成本最低或效率最高的方式进行维修。

式中  $w$ ——机会维修次数

利用迭代法对其进行求解即可求出不同机会维修阈值对应的维修费用, 从而求得使维修费用最低的最佳机会维修阈值。

### 2.5.2 维修费用优化模型

## 3 算例分析

由式(9)可知, 农机装备的维修总费用主要由 3 部分构成, 分别为故障小修费用  $C_{px}$ 、预防性维修费用  $C_{pj}$ 、更换维修费用  $C_{pg}$ , 农机装备各系统两两之间进行机会维修的维修费用可由机会维修费用矩阵表示为<sup>[22-23]</sup>

本文以国产某轮式拖拉机为例进行算法验证。根据近几年记录的历史故障数据, 得到了翻地作业和植保作业是该拖拉机在运行过程中易出故障的两项作业任务, 因此选取翻地作业和植保作业两任务阶段为算例进行分析。其中, 该拖拉机有 4 个故障率较高的子系统(依次为机油滤清器、变速器拨叉、高压油路、液压油泵), 并且该拖拉机在翻地作业任务阶段和植保作业任务阶段的工作时间  $t_1$ 、 $t_2$  分别为 650、280 h。假设该拖拉机各系统均服从两参数威布尔分布, 相关分布参数以及相关维修更换费用如表 2 所示。

$$B = \begin{bmatrix} C_{p11} & C_{p12} & \cdots & C_{p1i} & \cdots & C_{p1n} \\ C_{p21} & C_{p22} & \cdots & C_{p2i} & \cdots & C_{p2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots \\ C_{p_i1} & C_{p_i2} & \cdots & C_{p_{ii}} & \cdots & C_{p_{in}} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{p_n1} & C_{p_n2} & \cdots & C_{p_{ni}} & \cdots & C_{p_{nn}} \end{bmatrix} \quad (10)$$

在实际的生产作业过程中, 设定该拖拉机的任务可靠度阈值  $R^*$  为 0.8, 通过蒙特卡罗仿真得到机油滤清器、变速器拨叉、高压油路、液压油泵 4 个子系统的最低可靠度  $R_i$  分别为 0.90、0.85、0.75、0.8, 根据式(7)、(11)求解最佳维修不等周期和最优维修次数, 结果如表 3 所示。若机会维修阈值  $\Delta t$  取整, 利用二分法原理, 可得到不同机会维修阈值  $\Delta t$  下该拖拉机的最优维修费用, 结果如表 4 所示。当机会维修阈值  $\Delta t$  为 8 h 时, 该拖拉机的维修费用最低。

式中  $C_{pni}$ ——系统  $p_n$  与  $p_i$  进行机会维修的费用  
 在系统完整使用期间, 其机会维修总费用模型为

根据最佳机会维修阈值, 对拖拉机 4 个子系统进行最佳维修计划安排, 维修成本约为 2 587 元。对近 50 台同型号拖拉机事后维修策略的维修费用和生产损失数据进行统计, 该拖拉机在完成既定翻地作业与植保作业任务后的总维修成本(包括生产损失和维修费用)保守估计为 3 500 元左右, 对比机会维修总费用金额为 2 587 元, 本文提出的方法将

$$C_{pk} = \begin{cases} 0 & (Y(p, t_i) = 0) \\ C_{pj} + C_{px} \int_0^{T_{pip} - (t_{pi} - t_i)} \lambda_{pip}(t) dt & (Y(p, t_i) = 1) \\ C_{pg} + C_{px} \int_0^{T_{pip} - (t_{pi} - t_i)} \lambda_{pip}(t) dt & (Y(p, t_i) = 2) \end{cases} \quad (11)$$

式中  $T_{pip}$ ——系统  $p$  第  $i_p$  个维修周期内的作业时间

表2 拖拉机各系统的相关参数

Tab.2 Relevant parameters for each system

系统	翻地作业任务		植保作业任务		小修费用 $C_{ps}/\text{元}$	预防维修费用 $C_{pj}/\text{元}$	更换费用 $C_{pg}/\text{元}$	维修时间 $t_i/\text{h}$
	$\beta_1$	$\eta_1$	$\beta_2$	$\eta_2$				
机油滤清器	2.0	150	2.0	200	10	20	100	1
变速器拨叉	1.8	200	1.8	180	25	30	250	2
高压油路	1.5	180	1.2	150	35	60	300	5
液压油泵	1.2	250	1.2	300	50	100	900	8

表3 拖拉机各系统的最优维修周期

Tab.3 Optimal maintenance cycle of each system

系统	最优维修周期 h														
	翻地作业任务		植保作业任务		翻地作业任务		植保作业任务		翻地作业任务		植保作业任务		翻地作业任务		植保作业任务
翻地作业任务	机油滤清器	39.3	39.2	38.3	38.2	37.8	37.4	37.2	37.1	36.8	36.5	36.2	35.6	35.4	
	变速器拨叉	35.8	35.6	35.1	34.7	34.2	33.9	33.4	33.1	32.7	32.5	32.1	31.8	31.5	
	高压油路	77.8	77.3	76.8	76.5	76.2	75.9	75.6	75.2	74.8	74.5	74.2	73.8	73.3	
	液压油泵	84.5	84.2	83.7	83.4	83.0	82.6	82.4	83.9	83.4	83.1	82.9	82.5	82.2	
植保作业任务	机油滤清器	60.9	60.5	59.8	59.3	58.8	58.6	58.1	57.7	57.3	57.0	56.8	56.5	56.2	
	变速器拨叉	53.7	53.4	53.1	52.8	52.5	52.2	52.0	51.7	51.4	50.9	50.6	50.2	49.8	
	高压油路	47.5	47.3	46.9	46.6	46.5	46.1	45.8	45.4	45.1	44.9	44.7	44.5	44.3	
	液压油泵	67.2	66.9	66.7	66.2	65.8	65.4	65.0	64.9	64.7	64.3	63.8	63.6	63.1	

表4 不同维修阈值下装备维修费用

Tab.4 Equipment maintenance costs under different maintenance thresholds

机会维修阈值 $\Delta t/\text{h}$	维修费用 $C/\text{元}$	机会维修阈值 $\Delta t/\text{h}$	维修费用 $C/\text{元}$
0	3 627	6	2 853
1	3 543	7	2 744
2	3 382	8	2 587
3	3 166	9	2 664
4	3 049	10	2 831
5	2 982	11	3 074

总维修费用降低了30.4%，同时也保证了拖拉机的任务可靠性。

## 4 结束语

针对农机装备任务多样性的特点,提出了基于作业剖面的任务可靠性评估模型,对装备在不同作业任务下的可靠性进行了分析。基于装备任务可靠性和维修成本的关系,以及装备各子系统的相关性,对装备实施机会维修策略。以农机装备具体作业过程中的可靠性阈值为约束建立起合理的维修模型,并得到了具体任务下的最佳维修计划安排。本文提出的方法有助于提高农机装备的任务完成率,降低农机装备的故障发生率和维修损耗,从而减少维修费用,保证农业生产的效益。

## 参 考 文 献

- [1] 王万章,段铁城. 农业机械定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] 柳剑,魏泉,叶进,等. 在役农机装备预防性成组维修策略研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊2): 316-322, 448. LIU Jian, WEI Xiao, YE Jin, et al. Preventive group maintenance strategy for in-service agricultural machinery equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp.2): 316-322, 448. (in Chinese)
- [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] 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.
- [5] 卞瑞兵,张扬,潘正强,等. 基于二元决策图的护航编队多阶段任务体系可靠性分析[J]. 兵工学报, 2020, 41(5): 1016-1024. BIAN Ruibing, ZHANG Yang, PAN Zhengqiang, et al. Reliability analysis of phased-mission system of systems for escort formation based on BDD[J]. Acta Armamentarii, 2020, 41(5): 1016-1024. (in Chinese)
- [6] 张琪. 舰船任务可靠性建模与仿真技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019. ZHANG Qi. Research on reliability modeling and simulation technology of warship mission[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [7] 李博. 面向任务的无人机集群可靠性建模与评估[D]. 长沙: 国防科技大学, 2018. LI Bo. Mission-oriented reliability modeling and prediction for unmanned aerial vehicle swarm [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2018. (in Chinese)