

doi: 10.7690/bgzdh.2021.07.016

# 基于可靠度和效费比的特种车辆维修策略优化方法

胡道畅, 欧阳中辉, 陈青华, 樊辉锦

(海军航空大学岸防兵学院, 山东 烟台 264001)

**摘要:** 为解决军用特种车辆维修周期设定不当导致的维修成本增加、效率降低等问题, 提出一种单个更换周期不完全预防性维修计划的方法。采用役龄回退因子和故障率递增因子的混合故障率函数描述部件故障率变化趋势, 引入惩罚机制来减少偶然因素引起的故障维修延时问题, 以可靠度和维修方式效费比为约束条件确定维修周期。以某型军用车辆为例, 通过预先设定的可靠度阈值确定预防性维修周期, 根据计算不同预防性维修方式的效费比选择维修方式, 生成维修方案, 并与传统方案进行对比。结果表明: 该方法能有效降低故障率, 提高维修工作效率, 减少维修资源浪费。

**关键词:** 可靠度; 效费比; 不完全预防性维修策略; 混合故障率函数

**中图分类号:** TJ812; U464 **文献标志码:** A

## Optimization Method of Special Vehicle Maintenance Strategy Based on Reliability and Cost Effectiveness Ratio

Hu Daochang, Ouyang Zhonghui, Chen Qinghua, Fan Huijin

(School of Coastal Defense, Navy Aviation University, Yantai 264001, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of increasing maintenance cost and reducing efficiency caused by improper setting of maintenance cycle for military special vehicles, a method of incomplete preventive maintenance plan for single replacement cycle was proposed. The mixed failure rate function of service age regression factor and failure rate increasing factor is used to describe the change trend of component failure rate. The penalty mechanism is introduced to reduce the maintenance delay caused by accidental factors, and the maintenance cycle is determined with the constraints of reliability and cost-effectiveness ratio of maintenance mode. Taking a certain type of military vehicle as an example, the preventive maintenance cycle is determined by the preset reliability threshold, and the maintenance mode is selected according to the efficiency cost ratio of different preventive maintenance methods, and the maintenance scheme is generated and compared with the traditional scheme. The results show that the method can effectively reduce the failure rate, improve the maintenance efficiency and reduce the waste of maintenance resources.

**Keywords:** reliability; efficiency cost ratio; incomplete preventive maintenance strategy; mixed failure rate function

## 0 引言

军用特种车辆作为承担遂行火力突击、兵力输送、物资保障等重要作战任务的机动平台, 是部队形成战斗力的关键因素之一。由于其结构复杂、作战环境恶劣, 如何使其长期保持良好的作战状态成为亟待解决的问题; 因此, 立足现行维修制度, 依据科学理论, 制定合适的维修方案具有重要的现实意义。

目前特种车辆维修策略的制定缺乏科学理论依据, 主要采用以定期维修和事后维修为主的维修体制。其中定期维修采用多(维修次数多)、勤(检查频率勤)、细(保养项目细)的准则对车辆进行维修保养。事后维修又称故障后维修, 指当车辆出现故障和损坏时采用相应维修手段进行修复, 是一种非计

划维修方式, 该方式仅适用于故障影响较小的设备单元, 否则可能引发灾难性事故。以上 2 种维修方式很容易出现过维修和欠维修的情况, 导致维修资源浪费。

目前, 国内学者在针对装备维修策略制定方面已取得大量研究成果。文献[1]基于维修工作组方法, 以单位时间维修费用为决策目标建立了车辆装备总成预防性维修间隔期决策模型, 提出了车辆装备总成预防性维修策略; 文献[2]考虑检测与维修活动均不完全情况下的退化过程, 利用延迟时间模型进行了相应描述, 围绕双重不确定的检修活动, 构建了适合设备维修现场特征的长期维修计划优化模型; 文献[3]考虑了部件可靠性对机会维修阈值的影响, 在传统预防性维修策略基础上, 提出一种基于

收稿日期: 2021-04-29; 修回日期: 2021-05-28

作者简介: 胡道畅(1996—), 男, 河南人, 硕士, 从事兵器科学与技术研究。E-mail: 360085978@qq.com。

可靠性的列车关键部件机会预防性维修优化模型；文献[4]结合选择性维修理论、群体智能优化算法及多属性决策技术，提出了针对选择性维修策略优化和质量评估的新算法，构建了选择性维修决策模型；文献[5]综合考虑维修时间惩罚、故障总次数惩罚以及可用度惩罚等因素对总成本的影响，建立以出租方总成本最小为目标的预防性维修策略优化模型；文献[6]考虑维修计划和生产调度的相互依赖作用，提出了作业调度和非完美预防性视情维修的联合策略；文献[7]在基本随机回归系数模型的基础上，运用加速失效时间模型，加入协变量的影响，对设备的退化过程进行建模分析，建立了单位时间期望费用模型。

结合以上研究成果，笔者采用混合故障率函数，引入役龄回退因子和故障率递增因子描述役龄与维修次数对部件劣化情况造成的影响，采取预防性维修、预防性更换和事后维修等方式，考虑不同维修方式对装备可靠性和维修成本带来的影响，采用一种基于故障率的效费比方法作为部件维修方式的判断条件，提出一种设备单元单个更换周期的预防性维修策略制定方法，将其用于决策特种车辆柴油机曲柄连杆机构的维修计划，与传统等周期预防性维修决策模型进行对比，验证了该方法的有效性。

## 1 维修策略描述与基本假设

### 1.1 预防性维修策略描述

维修计划的制定是基层部队保证武器装备形成战斗力的关键步骤，依据车辆部件的故障发生规律，制定合理的维修计划能有效降低车辆故障发生概率、减少车辆维修费用、提高车辆维修效率、保证车辆战时效能充分发挥。

现有故障率分布函数多种多样，其中威布尔分布(Weibull Function)被广泛运用于机械、化工、电气、电子等领域的故障率表达，具有很好的适用性。通过改变其参数能演变为指数分布、正态分布等不同的表达形式。笔者采用二参数的威布尔分布作为车辆部件的故障率分布函数，考虑了车辆部件的劣化速度会随着役龄和预防性维修次数的增加而加快，在此引入役龄回退因子和故障率递增因子对该现象进行描述。在不同程度的劣化速度条件下，进行传统等周期预防性维修可能会导致无法保证装备可靠性以及维修资源的浪费。通过预先制定合适的可靠度阈值并基于此制定弹性的预防性维修周期，能在保证部件高可靠性的同时，提高维修计划的经

济性。当部件性能劣化速度达到一定水平后，预防性维修已不能对部件的工作性能进行有效改善，此时则需要对部件进行预防性更换。为了最大程度发挥部件的使用价值，避免维修资源的浪费，引入基于故障率的效费比分析方法来确定部件更换周期，即通过衡量改善相同程度的部件性能所花费的成本来确定采取的维修方式。

### 1.2 基本假设

为了简化计算、突出重点，在不影响方法通用性的前提下作出以下假设：

- 1) 车辆以全新状态运行，初始故障率为零。
- 2) 车辆出现的意外故障是可修复且均采用事后维修方式进行。
- 3) 事后维修对车辆故障率不产生影响；预防性维修能够一定程度上降低故障率，但不能恢复如初；预防性更换可使车辆部件恢复为全新状态，故障率降低为零。
- 4) 车辆发生故障会导致任务失败或超时等不良影响，在此引入停机成本对该不良影响进行量化评定。

## 2 决策方法的提出

### 2.1 推导混合故障率函数

根据调研数据，选取双参数的威布尔分布来描述某型车辆某部件的故障率变化规律，其表达式为：

$$\lambda(t) = \beta(t/\eta)^{\beta-1}/\eta, (t \geq 0, \beta \geq 0, \eta \geq 0) \quad (1)$$

式中： $\beta$ 为形状参数； $\eta$ 为尺度参数； $\beta$ 值影响故障率函数的形状， $\eta$ 值影响故障率函数的均值和广度，通过改变 $\beta$ 和 $\eta$ 的值可得到理想的故障率分布图形。

根据文献[8-10]提出的故障率变化规律，结合1.2节提出的假设，可以得出不同维修方式对故障率演变产生的影响不同，具体演变关系如下：

$$\lambda_i(t) = \begin{cases} \lambda_{i-1}(t) & \text{事后维修} \\ b_{i-1}\lambda_{i-1}(t + a_{i-1}\tau_{i-1}) & \text{预防性维修} \\ \lambda_i(t) & \text{预防性更换} \end{cases} \quad (2)$$

式中： $\lambda_1(t)$ 为部件初始状态下的故障率演变函数； $\lambda_i(t)$ 为第*i*个简单维修周期的故障率函数； $\tau_i$ 为第*i*个预防性维修周期； $a_i$ 为第*i*个预防性维修周期的役龄回退因子； $b_i$ 为第*i*个预防性维修周期的故障率递增因子； $a_i$ 和 $b_i$ 的值可通过分析部件的历史维修数据进行拟合得出。通过分析可知： $a_i$ 的值越大，部件故障率恢复的效果越差，役龄回退的程度越小； $b_i$ 的值越大，部件故障率增大的速度越快，部件劣

化程度越大；当  $\alpha_i=b_i=1$  时，部件故障率函数不变，仍按照当前状态继续工作。

如图 1 所示，事后维修前后部件故障率不发生变化。预防性维修后，部件劣化速度会增加  $b_i$  倍，部件性能会倒退到  $\sum_{k=1}^i a_k \tau_k$  役龄时刻；预防性更换后，部件故障率降低为 0，故障函数为初始故障率函数，即部件从全新状态开始工作。

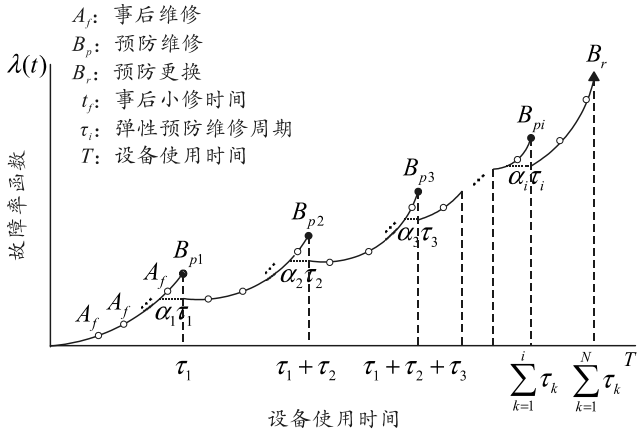


图 1 混合故障率函数描述部件故障率变化趋势

由式(1)和式(2)可计算得出部件第  $i$  个预防性维修周期的混合故障率函数：

$$\left. \begin{aligned} \lambda_i(t) &= \beta/\eta(t/\eta)^{\beta-1}, \quad i=1 \\ \lambda_i(t) &= \prod_{k=1}^{i-1} b_k \lambda_i(t + \sum_{k=1}^{i-1} a_k \tau_k), \quad i \geq 2 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

### 2.2 基于可靠度确定维修周期

如图 2 所示，部件在单个更换周期  $L$  内需要进行  $N$  次不完全预防性维修工作，其中前  $N-1$  次为预防性维修，维修周期为  $\tau_i$ ，第  $N$  次为预防性更换，事后维修不规则地分布在每个更换周期内。

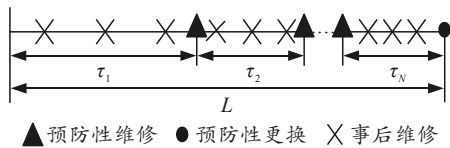


图 2 单个更换周期预防性维修时序

为了确定预防性维修周期  $\tau_i$ ，设置可靠度阈值  $R_0$ ，当部件可靠度  $R(t)=R_0$  时，对部件进行预防性维修。根据文献[11]，部件可靠度  $R(t)$  与部件工作的起始时间有关，其表达式为：

$$R(t) = \exp\left[-\int_{t_1}^{t_2} \lambda(t) dt\right] \quad (4)$$

由式(1)—(4)可得第  $i$  个预防性维修周期  $\tau_i$  为：

$$\tau_i = \eta(-\ln(R))^{1/\beta} \quad (5)$$

$$\tau_i = (-\ln(R))\eta^\beta / \prod_{k=1}^{i-1} b_k + \left(\sum_{k=1}^{i-1} a_k \tau_k\right)^{\nu\beta} - \sum_{k=1}^{i-1} a_k \tau_k, \quad (2 \leq i \leq N) \quad (6)$$

考虑到实际情况预防性维修周期不能无限长，所以有  $1 \leq \tau_i \leq T_{\max}$ 。

### 2.3 基于效费比选择维修方式

本文中描述了预防性维修、预防性更换和事后维修 3 种维修方式，不同维修方式花费的成本及对故障率产生的影响都不相同，由式(2)可知不同维修方式对部件故障率产生的影响如下所示：

1) 预防性维修：

$$\left. \begin{aligned} \lambda_i(t)^- &= \lambda_i(\tau_i) = \prod_{k=1}^{i-1} b_k \lambda_i(\tau_i + \sum_{k=1}^{i-1} a_k \tau_k), \quad \text{维修前} \\ \lambda_i(t)^+ &= \lambda_{\tau_{i+1}}(0) = \prod_{k=1}^i b_k \lambda_{\tau_{i+1}}(\sum_{k=1}^i a_k \tau_k), \quad \text{维修后} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$\Delta\lambda_i^1(t) = \lambda_i(t)^- - \lambda_i(t)^+ = \prod_{k=1}^{i-1} b_k \lambda_i(\tau_i + \sum_{k=1}^{i-1} a_k \tau_k) - \prod_{k=1}^i b_k \lambda_{\tau_{i+1}}(\sum_{k=1}^i a_k \tau_k) \quad (8)$$

2) 预防性更换：

$$\left. \begin{aligned} \lambda_i(t)^- &= \lambda_i(\tau_i) = \prod_{k=1}^{i-1} b_k \lambda_i(\tau_i + \sum_{k=1}^{i-1} a_k \tau_k), \quad \text{更换前} \\ 0, & \quad \text{更换后} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$$\Delta\lambda_i^2(t) = \lambda_i(t)^- - \lambda_i(t)^+ = \prod_{k=1}^{i-1} b_k \lambda_i(\tau_i + \sum_{k=1}^{i-1} a_k \tau_k) \quad (10)$$

3) 事后维修：

$$\Delta\lambda(t) = \lambda(t)^- - \lambda(t)^+ = 0 \quad (11)$$

当车辆部件出现非预期故障时，采取事后维修方式进行维修。在对部件进行预防性维修时，结合文献[12]引入效费比概念，通过对比降低单位故障率所要花费的维修成本来判断采取何种维修方式，不同维修方式对应的效费比公式如下：

$$k_m = \begin{cases} C_1 / (\Delta\lambda_i^1(t)), & m=1, \text{ 预防性维修} \\ C_2 / (\Delta\lambda_i^2(t)), & m=2, \text{ 预防性更换} \end{cases} \quad (12)$$

式中： $C_1$  为预防性维修花费的成本； $C_2$  为预防性更换花费的成本； $\Delta\lambda(t)$  为故障率下降量。当  $k_1 > k_2$  时，对部件进行预防性更换；当  $k_1 \leq k_2$  时，对部件进行预防性维修。

### 2.4 维修成本及维修成本率

在单个预防性更换周期  $L$  内，部件需要进行  $N$  次预防性维修和  $M$  次事后维修，花费的总成本  $M_c$

包括预防性维修成本  $C_s$ 、事后维修成本  $C_a$ 、故障维修惩罚成本  $C_e$  以及停机损失  $C_d$ ，即单个更换周期的总成本为：

$$M_c = C_s + C_a + C_e + C_d. \quad (13)$$

#### 1) 预防性维修成本 $C_s$ 。

预防性维修包括预防性维修和预防性更换，分别用  $C_t$  和  $C_r$  来表示单次预防性维修和预防性更换的费用，则单个更换周期内预防性维修成本  $C_s$  为：

$$C_s = (N-1)C_t + C_r. \quad (14)$$

#### 2) 事后维修成本 $C_a$ 。

当部件出现非预期故障时需要采用事后维修进行处理，单次事后维修的平均成本为  $C_m$ ，在第  $i$  预防性维修周期  $\tau_i$  内发生非预期故障的次数期望为  $l_i$  次，其中：

$$l_1 = \int_0^{\tau_1} \lambda_1(t) dt = (\tau_1/\eta)^\beta; \quad (15)$$

$$l_i = \int_0^{\tau_i} \lambda_i(t) dt = \left( \prod_{k=1}^{i-1} b_k \right) \cdot \left( (\tau_i + \sum_{k=1}^{i-1} a_k \tau_k) / \eta \right)^\beta - \left( (\tau \sum_{k=1}^{i-1} a_k \tau_k) / \eta \right)^\beta, (2 \leq i \leq N). \quad (16)$$

则事后维修成本  $C_a$  为：

$$C_a = C_m \sum_{k=1}^N l_i. \quad (17)$$

#### 3) 故障维修惩罚成本 $C_e$ 。

当出现非预期故障进行事后维修时，维修的时间越长造成的损失就会越大，为了减小维修延迟造成的不良影响，制定相应的惩罚机制以缩短延迟时间。假设  $\delta$  为事后维修的最大允许时间，如果  $\delta$  时间内没有完成事后维修则会产生惩罚。故障维修时间的概率密度函数包含多种，一般采用最大熵法、Bootstrap 等方法确定<sup>[13]</sup>，在此针对部件的“无记忆性”，选用指数分布作为概率密度函数，即部件事后维修时间与维修经验无关，其表达形式如下：

$$f(t) = e^{-(t/\text{MTTR})} / \text{MTTR}, t \geq \delta. \quad (18)$$

式中 MTTR 表示平均故障时间，即部件事后维修花费的平均时间，其值可根据历史维修数据得出。超出最大允许时间  $\delta$  后单位时间的惩罚成本为  $C_b$ ，则部件故障维修惩罚成本  $C_e$  为：

$$C_e = C_b \int_{\delta}^{\infty} (t - \delta) f(t) dt \cdot \sum_{k=1}^N l_i. \quad (19)$$

#### 4) 停机损失 $C_d$ 。

车辆因为故障或者预防性维修无法正常出动可

能会导致任务超时或失败，在此引入停机损失  $C_d$  来量化该种情况造成的不良影响，假设单位停机时间造成的损失为  $C_v$ ，停机时间  $M_t$  包括预防性维修时间、预防性更换时间和事后维修时间，则停机损失  $C_d$  可以表示为：

$$C_d = C_v M_t = C_v ((N-1)t_1 + t_2 + \text{MTTR} \cdot \sum_{i=1}^N l_i). \quad (20)$$

式中： $t_1$  为单次预防性维修时间； $t_2$  为平均预防性更换时间。

部件的整个更换周期包括预防性维修周期和停机时间，即

$$L = \sum_{k=1}^{N-1} \tau_k + M_t = \sum_{k=1}^{N-1} \tau_k + (N-1)t_1 + t_2 + \text{MTTR} \cdot \sum_{k=1}^N l_i. \quad (21)$$

单个部件在更换周期内的维修成本率为：

$$C_R = M_c / L. \quad (22)$$

综上所述，该方法的步骤如下：

1) 通过历史维修数据拟合部件混合故障率函数，确定威布尔分布中的形状参数  $\beta$ 、尺度参数  $\eta$  以及役龄回退因子  $\alpha_i$  和故障率递增因子  $b_i$ ；

2) 根据部件混合故障率函数和既定的可靠度阈值  $R_0$  确定各预防性维修周期  $\tau_i$ ；

3) 计算各预防性维修周期不同维修方式的效费比，通过比较效费比的大小确定部件维修方式；

4) 根据实际维修工作中的各项花费计算出方案的维修成本和维修成本率；

5) 综合上述步骤得到的维修周期、维修方式以及各项维修成本，生成最终的预防性维修方案。

## 3 实例验证

### 3.1 案例背景

柴油机曲柄连杆机构是保证车辆正常行驶的关键部位之一，作用是将活塞的往复运动转变为曲轴的旋转运动；同时，将作用于活塞上的力转变为曲轴对外输出的转矩，为车辆行驶提供动力。为验证方法的有效性，以某团车队的历史维修数据为样本，对某型车辆的曲轴连杆机构进行分析，制定相应的维修计划。

根据历史维修数据，对曲柄连杆机构的混合故障率函数进行拟合，其故障率分布服从  $\beta=2$ ， $\eta=154.25$  的双参数威布尔分布，其函数表达式为  $\lambda(t)=2t/(154.25^2)$ ，役龄回退因子  $a_i=i/(6i+8)$ ，故障率递增因子  $b_i=(11i+1)/(10i+1)$ ，其他的维修参数如表 1 所示。

表 1 维修参数设置

维修参数	$C_t$	$C_r$	$C_m$	$C_v$	$C_b$	$t_1$	$t_2$	$\delta$	MTTR	$T_{max}$
取值	100	1800	250	350	200	0.7	0.4	0.5	0.5	180

3.2 实例仿真

为充分验证方法的正确性,对 0.65、0.75、0.85 和 0.95 等 4 个不同的可靠度阈值进行仿真,根据式 (5)—(8)可得到部件可靠度随时间发生的变化及其预防性维修周期,结果如图 3 所示。

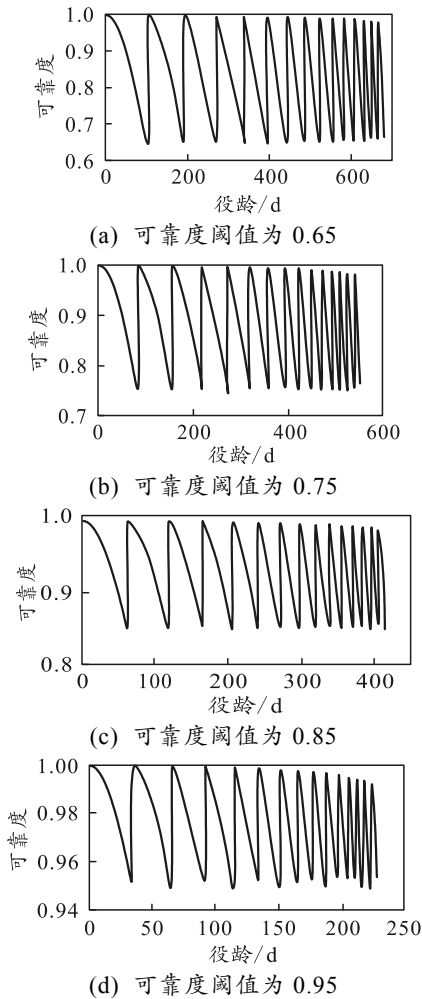
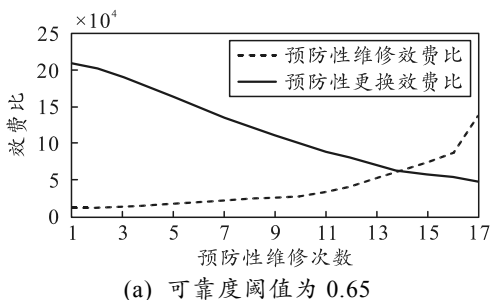
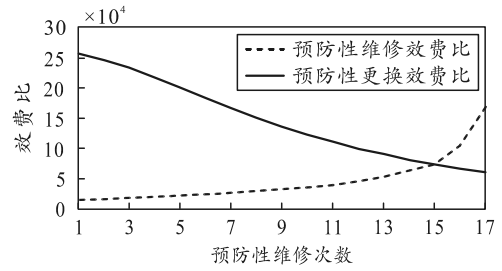


图 3 部件可靠度变化趋势

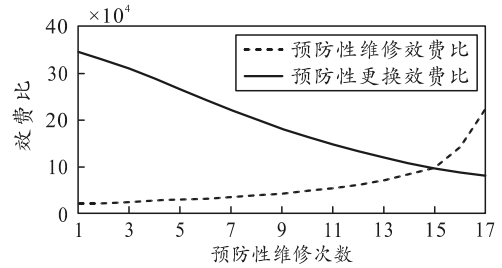
根据式(9)—(14)可求出部件每次进行预防性维修时采用不同维修方式产生的效费比,结果如图 4 所示。



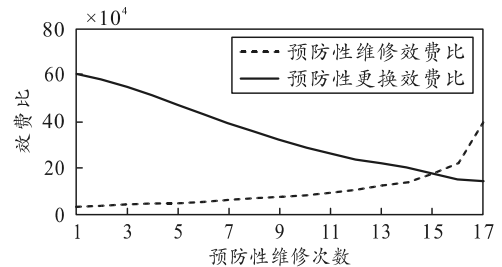
(a) 可靠度阈值为 0.65



(b) 可靠度阈值为 0.75



(c) 可靠度阈值为 0.85



(d) 可靠度阈值为 0.95

图 4 不同预防性维修方式效费比变化趋势

由 2.3 节可知:当效费比  $k_1 > k_2$  时,对部件进行预防性更换;当效费比  $k_1 \leq k_2$  时,对部件进行预防性维修。由图 4 可知:当部件可靠度阈值分别设置为 0.65、0.75、0.85 和 0.95 时,部件的预防性维修次数为 14、15、15 和 16 次。

根据式(13)—(22)可计算出各可靠度阈值下制定的单个更换周期维修计划所耗费的各项成本及成本率,结果如表 2 所示。

表 2 维修计划成本组成

可靠度阈值	$C_s$	$C_a$	$C_c$	$C_d$	$M_c$	$C_R$
0.65	3 100	1 507.74	221.87	4 625.41	9 455.02	13.89
0.75	3 200	1 078.81	158.75	4 325.17	8 762.72	15.35
0.85	3 200	609.45	89.68	3 996.61	7 895.74	18.31
0.95	3 300	205.17	30.20	3 958.62	7 493.99	29.73

综上所述,可得到不同可靠度阈值下单个更换周期的预防性维修方案,结果如表 3 所示。

根据仿真结果可得出以下结论:

1) 随着役龄的增加和预防性维修工作的进行,柴油机曲柄连杆机构磨损程度和老化速度不断加快,体现在役龄回退因子和故障率递增因子不断变大。由于受可靠度阈值的约束,部件的预防性维修周期将逐渐缩减。

表 3 预防性维修方案优化结果

安全度阈值	预防性维修周期/d	更换周期/d	总维修成本/元	维修成本率/(元/d)
0.65	$\tau_1=101.24, \tau_2=89.97, \tau_3=77.80, \tau_4=66.76, \tau_5=57.29, \tau_6=49.35, \tau_7=42.71, \tau_8=37.16, \tau_9=32.48, \tau_{10}=28.52, \tau_{11}=25.15, \tau_{12}=22.25, \tau_{13}=19.74, \tau_{14}=17.57$	680.50	9 455.02	13.89
0.75	$\tau_1=82.73, \tau_2=73.52, \tau_3=63.58, \tau_4=54.55, \tau_5=46.82, \tau_6=40.33, \tau_7=34.90, \tau_8=30.36, \tau_9=26.55, \tau_{10}=23.31, \tau_{11}=20.55, \tau_{12}=18.18, \tau_{13}=16.13, \tau_{14}=14.36, \tau_{15}=12.81$	571.04	8 762.72	15.35
0.85	$\tau_1=62.18, \tau_2=55.26, \tau_3=47.79, \tau_4=41.00, \tau_5=35.19, \tau_6=30.31, \tau_7=26.23, \tau_8=22.82, \tau_9=19.95, \tau_{10}=17.52, \tau_{11}=15.45, \tau_{12}=13.67, \tau_{13}=12.13, \tau_{14}=10.79, \tau_{15}=9.63$	431.34	7 895.74	18.31
0.95	$\tau_1=34.93, \tau_2=31.04, \tau_3=26.85, \tau_4=23.04, \tau_5=19.77, \tau_6=17.03, \tau_7=14.74, \tau_8=12.82, \tau_9=11.21, \tau_{10}=9.84, \tau_{11}=8.68, \tau_{12}=7.68, \tau_{13}=6.81, \tau_{14}=6.06, \tau_{15}=5.41, \tau_{16}=4.83$	252.05	7 493.99	29.73

2) 由图 3 可知：随着可靠度阈值的提升，部件预防性维修周期  $\tau_i$  整体缩短，预防性维修次数  $N$  增加，更换周期  $L$  缩短，原因是为了保证部件可靠度不低于阈值，需要提高部件预防性维修的频率，增加预防性维修次数，由于每次预防性维修都会加快部件老化速度，所以部件寿命将会变短。

3) 由表 2 可知：可靠度阈值越高，部件单个更换周期的事后维修成本  $C_a$ 、故障维修惩罚成本  $C_e$ 、停机损失  $C_d$  和总成本  $M_c$  越低，预防性维修成本  $C_s$  和维修成本率  $C_R$  越高，这是由于随着可靠度阈值增加，部件的非预期故障次数期望值降低，即部件出现故障的次数降低，停机时间减少；此外，可靠度阈值的增加会大幅缩短部件的更换周期，并大幅增加维修成本。

3.3 对比分析

为验证该方法的有效性，与文献[14]中采用的等周期预防性维修决策优化模型进行了对比分析，该模型采用效费比确定预防性维修次数后，利用搜索步长为 1 的方法寻找最优变量，即最佳预防性维修周期，进行定期预防性维修。将该模型运用到本文中的案例背景中，经过仿真计算得到的优化结果如表 4 所示。

表 4 等周期预防性维修模型优化结果

预防性维修次数	预防性维修周期/d	更换周期/d	总维修成本/元	维修成本率/(元/d)
15	36	540	11 941.32	22.11

表 3 中，可靠度阈值为 0.85 的优化结果与等周期预防性维修决策模型的优化结果具有相同的预防性维修次数，对比 2 项结果可以发现相对于等周期预防性维修决策模型，本文中提出的方法部件更换周期缩短了 20.12%，维修成本率降低了 17.23%。

为进行更深入的分析，将 2 种优化结果的维修成本组成、非预期故障次数期望变化趋势以及可靠度变化趋势进行对比。

综合表 5、图 5 和图 6 可以发现：相同预防性维修次数条件下，2 种优化结果的预防性维修费用相同，然而等周期预防性维修决策模型在维修计划前期的预防性维修过于频繁，导致了维修资源浪费；计划后期预防性维修频率较低，维修不及时，部件在低可靠度水平下运行，非预期故障次数期望值较大；因此，大量的维修资源被用于事后维修和弥补停机损失。经过对比可得出结论：相对于传统等周期维修模型，本文中提出的优化方法既能保证部件工作可靠性，又能降低维修成本。

表 5 维修成本组成对比结果

维修计划	$C_s$	$C_a$	$C_e$	$C_d$	$M_c$	$C_R$
本文维修计划	3 200	609.45	89.68	3 996.61	7 895.74	18.31
等周期维修计划	3 200	3 197.53	470.52	5 073.27	11 941.32	22.11

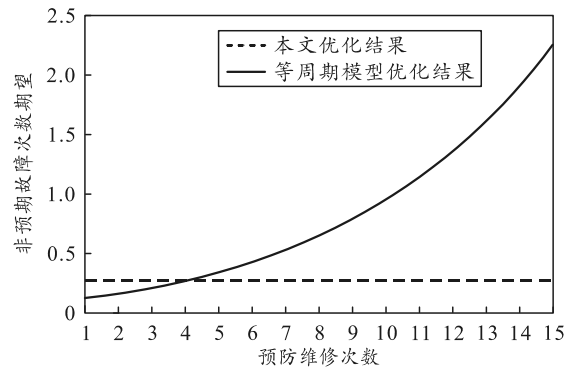


图 5 非预期故障次数期望变化趋势对比结果

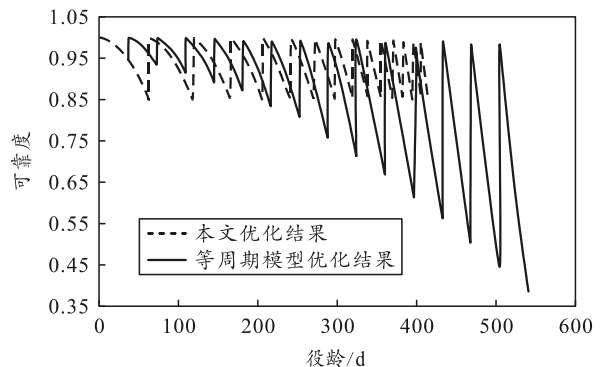


图 6 可靠度随役龄变化趋势对比结果