

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2312550

基于维纳退化过程的装备视情维修策略研究*

董正琼 李晨阳 聂磊 周向东 范宜艳

(湖北工业大学机械工程学院 武汉 430068)

摘要: 在利用维纳退化过程对装备进行建模时,为更加准确地描述其关键部件的退化过程,提出考虑维修活动对装备性能退化速率和初始退化量的影响;在所建模型的基础上,基于首达时间的概念得到剩余寿命的概率分布,根据剩余寿命的预测值作为时间间隔开展非周期性能检测,将得到的退化量同故障阈值和维修阈值相比较,做出相应维修活动;然后,以维修阈值为变量,在关键部件的视情维修策略中,应用蒙特卡罗循环仿真方法选取最优值实现效费比最小,进而降低装备在使用过程中的效费比;最后,以舰船关键部件陀螺仪为例,仿真得到剩余寿命预测值的相对误差小于0.3%,当设置维修阈值为 $8.02^{\circ}/d$ 时,效费比达到最低为199.996元/天,与传统周期检测视情维修策略相比,节约了检测成本,降低了事后维修的次数,减少了维修费用,有效地降低了效费比。

关键词: 维纳过程;剩余寿命;视情维修

中图分类号: N945.17 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.1050

Research on equipment condition-based maintenance strategy based on Wiener degradation process

Dong Zhengqiong Li Chenyang Nie Lei Zhou Xiangdong Fan Yiyan

(School of Mechanical Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: In order to describe the degradation process of key components more accurately, the influence of maintenance activities on the degradation rate and initial degradation of equipment performance was proposed when the Wiener degradation process is used to model equipment. Based on the established model, the probability distribution of the remaining useful life is obtained based on the concept of first arrival time. According to the predicted value of the remaining useful life, the aperiodic performance detection is carried out as the time interval, and the degradation value obtained is compared with the fault threshold and maintenance threshold, the corresponding maintenance activities are made. Then, taking maintenance threshold as variable, Monte Carlo cycle simulation method is used to select the optimal value to achieve the minimum cost-effectiveness ratio in the condition-based maintenance strategy of key components, so as to reduce the cost-effectiveness ratio during the use of equipment. Finally, the ship component gyroscope is taken as an example, the simulation results show that the relative error of the predicted the remaining useful life value is less than 0.3%. When the maintenance threshold is set as 8.02 degrees/day, the efficiency ratio reaches the lowest as 199.996 yuan/day. The simulation and comparison between periodic detection of condition-based maintenance strategy show that the proposed method can save the detection cost, cut down the number of the breakdown maintenance, decrease the maintenance cost, and effectively reduce the cost-effectiveness ratio.

Keywords: Wiener process; remaining useful life; condition-based maintenance

0 引言

在实战化装备的使用过程中,对其关键部件的性能退化过程进行监测,并根据性能退化量合理开展预防性维修(完美维修和不完美维修),可消除故障隐患,减少事后维修

的发生,避免意外停机等风险。因此,开展关键部件的性能退化过程建模,并在此基础上制定最佳视情维修(condition-based maintenance, CBM)策略具有重要的军事意义和经济效益^[1-3]。

目前,已有诸多学者针对退化过程模型开展了视情维

收稿日期:2023-01-04

* 基金项目:国家自然科学基金(51975191)、湖北省教育厅项目(B2018043)资助

修策略的研究工作,并取得了较为丰硕的研究成果。例如,葛恩顺等^[4]基于伽马过程建立劣化系统的视情维修,以定期检测的方式获知系统状态,通过对检测周期和更换策略联合优化,达到系统长期运行费用率最低。杨立乾等^[5]基于伽马过程的船舶关键部件性能退化模型,制定了状态监测时间优化、维修时间选择和维修策略优劣准则判别的视情维修策略。林名驰等^[6]基于维纳过程建立了单部件系统性能退化模型,推导出维修阈值的计算表达式,从而开展动态性能检测视情维修,根据部件退化状态安排性能检测时间,有效的减少了事后维修次数,降低了装备的维修成本。Phuc等^[7]考虑完美维修与非完美维修的视情维修,深入探究了非完美维修活动对系统退化速率的影响,并提出一种自适应维护策略,选择出最佳的维修手段。Chen等^[8]针对连续监测退化系统考虑了非完美维修的最大维护次数,通过搜索最佳维修阈值来平衡维修成本和可用度,实现了对视情维修策略的优化。Li等^[9]在采用维纳过程描述元动作单元的性能退化时,考虑了维修次数对退化率的影响,建立了非完美维修的视情维修策略,获得最佳的预防性维护阈值、检查周期和最佳维护次数,实现效费比最低,为制定维修决策提供了有效参考。David等^[10]考虑具有随机效应的gamma退化过程,在总体运行成本最小化的约束条件下,研究视情维修的策略结构性质,确定了最优检测时长间隔。Li等^[11]提出一种基于逆高斯(inverse Gaussian, IG)退化过程的面向任务系统动态状态维护优化模型,采用动态维修阈值函数控制任务系统的早期故障率,有效地降低了成本和系统运行风险。Roger等^[12]运用自适应贝叶斯方法描述随机退化过程的不确定性,在两种不同安全约束的影响下建立了基于随机退化过程的单元模型,进而给出了最优的检测与维修方案。

总的来说,上述基于退化过程的视情维修策略在一定程度上降低了事后维修的次数,降低了效费比,但在实际工程中,需考虑到维修活动对其初始退化量和退化速率的双重影响,从而准确的描述部件的退化过程。此外,由于检测成本高昂,周期性的检测代价较高,因此,需要选择合适的检测时间,既要保证掌握部件的退化趋势,又不浪费人力和物力资源;维修阈值的设置同样如此,过低导致部件需要频繁维修,造成过剩维修,增加维修费用,过高则无法保证部件工作的可靠性和安全性。因此,文中首先基于维纳过程建立退化模型,在维修手段上考虑事后维修和预防性维修(完美维修和非完美维修),同时考虑了非完美维修活动对退化模型的退化率快慢和初始退化量大小的影响,对退化模型的轨迹方程进行不断更新,在首达时间的意义下得出剩余寿命的概率分布,从而对剩余寿命进行精准的预测;在此基础上根据剩余寿命的预测值作为时间间隔进行非周期性的性能检测,将检测到的性能退化量和故障阈值与维修阈值相比较,判断需进行何种维修活动;在上述视情维修策略中,应用蒙特卡洛循环仿真方法,选取最佳维修阈值,可

有效降低事后维修的发生次数,实现效费比的最优值。最后以舰船导航系统的重要部件陀螺仪为例,建立基于维纳退化过程的视情维修仿真策略并进行仿真试验,验证所提策略的有效性,为装备维修保障策略的研究提供有效参考。

1 模型假设

1.1 问题描述

图1所示为部件退化过程示意图,描述了部件在工作中的性能退化状况,其性能退化量从初始值逐渐增加,当其超过故障阈值,部件会发生故障,需进行事后维修,且可能会造成计划外的系统停机从而产生额外的成本以及不可预计的危害。因此,设置维修阈值,在部件的退化量达到故障阈值前,进行预防性维修活动(完美维修和非完美维修),防止其发生故障。本文基于维纳退化过程刻画了部件的性能退化,开展视情维修策略的研究,保障装备的安全运行,实现效费比的最小化。在此基础上探讨如下问题:

- 1)如何基于维纳过程建立关键部件的退化模型,并考虑维修活动对退化模型退化率和初始退化量的影响;
- 2)如何基于剩余寿命预测值开展性能退化的检测,以此建立起视情维修决策;
- 3)在视情维修决策流程中如何确定最优维修阈值使得效费比最低。

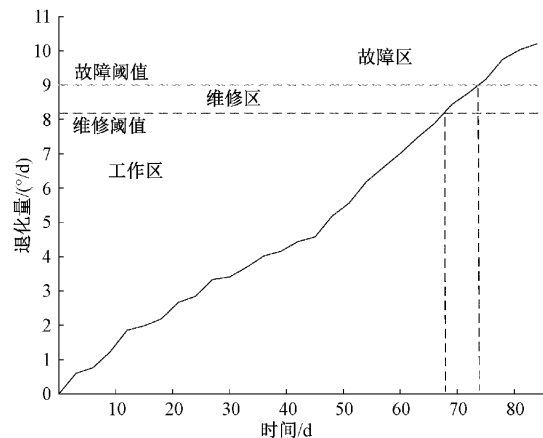


图1 部件退化过程

1.2 模型假设

1)随机退化过程 $X(t)$ 为 t 时刻部件的性能退化量,当 $X(t) > \omega_f$ (部件的故障阈值),部件发生故障,需进行事后维修,使得其状态恢复如新,即 $X(t) = 0$;

2)当 $\omega_f > X(t) > \omega_p$ (部件维修阈值),部件进行预防性维修,预防性维修手段包括完美维修和非完美维修两类,完美维修后部件的状态恢复如新,即 $X(t) = 0$,但维修起点不同于事后维修,因此维修费用较少。不完美维修后部件退化状态有所改善,即 $0 < X(t) < \omega_f$;

3)不完美维修活动后,退化函数加入残余退化量 $X_2(0)$ 和退化速率 λ_k 的影响,并且随着不完美维修次数增

加,残余退化量 $X_k(0)$ 和退化速率 λ_k 逐渐增大,设置自部件全新的情况下,能进行不完美维修次数至多为 3 次;

4) 维修费用参数:事后维修费用 F_1 ,完美更换维修费用 F_2 ,非完美维修费用 F_3 ,检测性能费用 F_4 ;

5) 维修次数参数:事后维修次数 N_1 ,完美更换维修次数 N_2 ,非完美维修次数 N_3 ,检测性能次数 N_4 ;

6) 维修时长参数:事后维修时长 W_1 ,完美更换维修时长 W_2 ,非完美维修时长 W_3 ;

7) 总维修检测费用 $E = F_1 \cdot N_1 + F_2 \cdot N_2 + F_3 \cdot N_3 + F_4 \cdot N_4$;

8) 有效工作时长 $T = Time - W_1 \cdot N_1 + W_2 \cdot N_2 + W_3 \cdot N_3$, $Time$ 为任务周期时长;

9) 本文目标是在长期任务周期内通过性能检测点的选择和最优维修阈值的设置,求取最小效费比 C ,效费比是部件在任务周期内的总维修检测费用 E 与其有效工作时长 T 的比值。

2 退化过程建模与寿命预测

维纳随机过程是一种带有漂移项的扩散随机过程,可以较好地描述部件线性的性能退化轨迹。因此,本文采用维纳随机过程建立关键部件的过程退化模型。

2.1 基于维纳过程的退化模型建立

关键部件事后维修和完美维修后的部件性能退化过程是从全新状态开始工作,其性能状态逐渐下降,退化量增加,即定义部件在任意时刻 t 时的性能退化量为 $X(t)$,基于维纳过程建立的退化函数为:

$$X(t) = X(0) + \lambda t + \sigma B(t) \quad (1)$$

式中: $X(0)$ 为部件的初始退化量,且 $X(0) = 0$; λ 为漂移系数,用以表征部件的退化速率; σ 为扩散系数体现部件退化轨迹的波动程度; $B(t)$ 为标准布朗运动,用以表示退化过程的时变不确定性,且 $B(t) \sim N(0, t)$ 。

进行非完美维修活动后,部件退化状态有所改善^[13],但考虑到历史退化数据,进行非完美维修活动后部件存在残余退化量,其初始退化量不再为零,并随着非完美维修次数增加逐渐递增;同时漂移系数也随着非完美维修的进行而改变,具体表现为 $\lambda_k = \lambda_{k-1} + v_k$,式中 $v_k \sim N(0, \varepsilon^2)$ 。非完美维修活动下部件的性能退化轨迹表达式为:

$$X_k(t) = X_k(0) + \lambda_k t + \sigma B(t) \quad (2)$$

式中: $X_k(t)$ 为第 k 次非完美维修后 t 时刻部件的性能退化量; $X_k(0)$ 表示第 k 次非完美维修后部件的初始退化量,其由非完美因子决定,具体描述如式(3)所示。

$$X_k(0) = q \cdot \omega_p + (N_3 - 1) \cdot z_k \quad (3)$$

式中: q 为非完美因子,表征非完美维修带来的残余退化量; ω_p 表示部件的维修阈值; N_3 表示非完美维修活动的次数; Z_k 服从正太分布, $Z_k \sim N(0, \varepsilon^2)$ 且大于 0。

2.2 退化过程剩余寿命预测

基于上述部件退化过程 $\{X(t), t \geq 0\}$, 根据随机过程

的首达时间概念^[14], 当其退化量首次超过规定故障阈值 ω_f 时, 则发生失效, 对应的失效时间即为系统寿命 T :

$$T = \inf\{t; X(t) \geq \omega_f \mid X(0) \leq \omega_f, t \geq 0\} \quad (4)$$

已知带有线性漂移的维纳过程首次到达故障阈值的失效时间服从逆高斯分布, 因而具有解析解, 其概率密度函数(probability density function, PDF) 如式(5)所示。

$$f_T(t) = \frac{\omega_f}{\sqrt{2\pi\sigma^2 t^3}} \exp\left(-\frac{(\omega_f - \lambda t)^2}{2\sigma^2 t}\right) \quad (5)$$

由每个寿命值与其概率的乘积之和作为其期望值计算可求得 T 的期望值, 如式(6)所示。

$$E[T] = \int_0^{\infty} t \cdot f_T(t) dt = \frac{\omega_f}{\lambda} \quad (6)$$

非完美维修活动下对应的系统寿命 T , 其表达式如式(7)所示。

$$T = \inf\{t; X_k(t) \geq \omega_f \mid X_k(0) \leq \omega_f, t \geq 0\} \quad (7)$$

非完美维修活动下, PDF 的计算方法与上述相同, 具体表达式如式(8)所示。

$$f_T(t) = \frac{\omega_f - X_k(0)}{\sqrt{2\pi\sigma^2 t^3}} \exp\left(-\frac{(\omega_f - X_k(0) - \lambda t)^2}{2\sigma^2 t}\right) \quad (8)$$

其寿命 T 期望值计算如式(9)所示。

$$E[T] = \int_0^{\infty} t \cdot f_T(t) dt = \frac{\omega_f - X_k(0)}{\lambda} \quad (9)$$

根据式(6)和(9), 在部件退化过程中可对关键部件的剩余寿命进行实时预测, 进而方便安排视情维修的性能检测。

3 退化过程的视情维修

上述章节基于维纳过程建立了退化过程模型, 并进行了剩余寿命的预测, 本节将根据退化过程模型开展视情维修活动。

3.1 视情维修决策流程

文中视情维修策略采用非周期性的性能检测。首先在部件全新状态下或者不完美维修活动后的非全新状态下通过剩余寿命的预测值, 确定首次检测时刻点, 比较首次检测时刻点的退化量与两阈值之间的大小关系, 判断是否需要维修, 若不需进行维修, 则再次进行寿命的预测, 确定第二次的检测时间, 并在时间到达时, 判断其进入何种维修活动, 不再继续进行下一次性能检测。该性能检测方法可以避免部件退化量接近维修阈值时多次无效检测, 有效的降低检测成本, 同时准确的剩余寿命预测也保障了其可靠性安全性要求。部件视情维修策略仿真流程如图 2 所示。

如图 2 所示, 视情维修策略由检测、维修和指标统计计算 3 个阶段构成。检测阶段首先根据剩余寿命的预测值, 安排首次性能检测, 若是首次检测退化量小于维修阈值, 再次预测剩余寿命, 安排第二性能检测。维修阶段根据退化量与故障阈值的大小关系, 安排具体的维修活动。指标

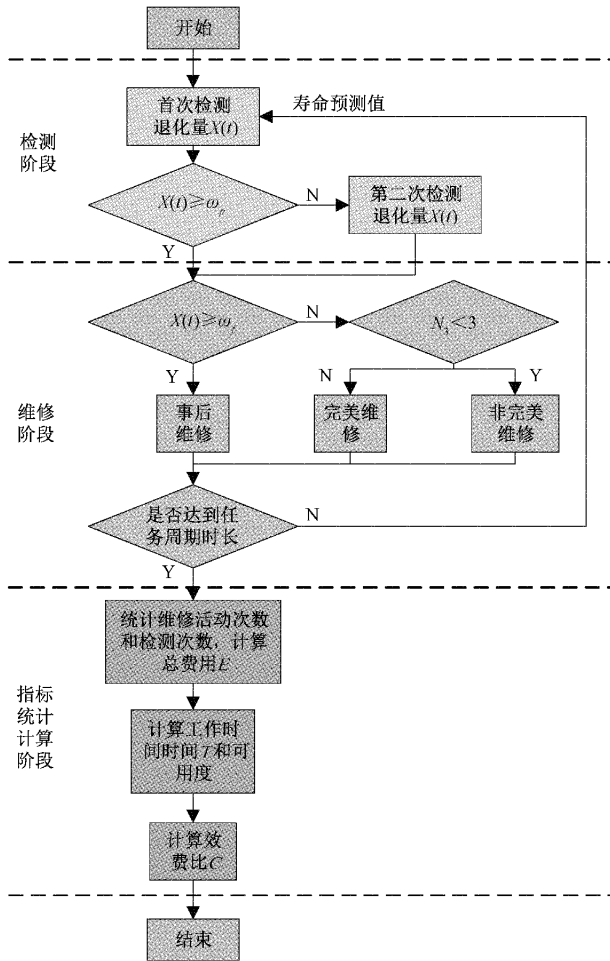


图2 视情维修策略仿真流程

统计计算阶段对该次仿真的不同维修方式开展次数和性能检测次数、有效工作时长 T 进行统计,并计算总维修检测费用 E 和效费比 C 。

3.2 维修阈值判断方法

维修阈值是影响效费比高低的重要因素,在本文中采用了非周期检测方法,需考虑到首次检测点的性能退化量超过故障阈值的概率问题。同时,维修阈值的设置范围还需保证部件的有效工作时长,避免过剩维修的情况发生。

在3.1节所述非周期检测方法中,首先根据式(9)计算出全新状态下退化量到达维修阈值 ω_p 时的剩余寿命预测值,得到面向维修阈值确定首次检测的起点为 $t_0 = \omega_p/\lambda$,即为初始的寿命预测值,在此起点计算第一次检测时的退化量如式(10)所示。

$$X(t_0) = \omega_p + \sigma B\left(\frac{\omega_p}{\lambda}\right) \quad (10)$$

考虑首次检测退化量 $X(t_0)$ 超过故障阈值的概率问题,对维修阈值 ω_p 进行调整,降低首检退化量超过故障阈值的概率,减少事后维修的次数,降低维修成本。因此对 $X(t_0) < \omega_f$ 的概率进行求解:

$$P(X(t_0) < \omega_f) = P\left(B\left(\frac{\omega_p}{\lambda}\right) < \frac{(\omega_f - \omega_p)}{\sigma}\right) \quad (11)$$

$B(\omega_p/\lambda) \sim N(0, \omega_p/\lambda)$ 服从正态分布,因此:

$$P\left(B\left(\frac{\omega_p}{\lambda}\right) < \frac{(\omega_f - \omega_p)}{\sigma}\right) = F\left(\frac{(\omega_f - \omega_p) - 0}{\frac{\sigma}{\sqrt{\omega_p/\lambda}}}\right) \quad (12)$$

当概率大于99%时,查询标准正态分布表,可得:

$$\frac{(\omega_f - \omega_p) - 0}{\frac{\sigma}{\sqrt{\omega_p/\lambda}}} \geq 2.32 \quad (13)$$

根据文献[6]得到故障阈值 ω_f 值为 $9^\circ/\text{d}$,在首次检测退化量不超过故障阈值的概率为99%的情况下,根据式(13)计算得到维修阈值 ω_p 的值为 $8.05^\circ/\text{d}$ 。在降低首检退化量超过故障阈值的概率,减少事后维修次数的同时,维修阈值也有所减小,导致部件工作的时长也有所降低,使得在任务周期内预防性维修次数增加,易造成部件过剩维修,从而增加维修费用。为平衡二者之间的影响,达到最佳效果,在计算所得的维修阈值附近取多组值进行蒙特卡洛仿真,选取最优的维修阈值,实现最佳的可用度与效费比。

4 仿真实验对比

为验证所提方法的科学性,以舰船导航系统的重要设备部件陀螺仪为例,建立仿真模型,对以上方法策略进行实验验证。由文献[6]得到部件的漂移系数 λ 和扩散系数 σ 分别为0.12和0.05,利用参数估计法^[15],计算得到两参数分别为0.1199和0.0491。已知陀螺仪的故障阈值 ω_f 值为 $9^\circ/\text{d}$,根据第3.2节中计算的维修阈值结果,在仿真中设置维修阈值 ω_p 从 $7.9^\circ/\text{d} \sim 8.3^\circ/\text{d}$,步长间距为0.4。任务周期时长、各类维修和检测活动的时长与费用如表1所示。在3.1节所示的视情维修策略框架下将以上数据参数以及模型假设相关参数导入进行蒙特卡洛循环仿真1000次(仿真次数为800左右即可达到收敛)。

表1 相关参数设置

名称	数值
$F_1/(\text{元} \cdot \text{次}^{-1})$	50 000
$F_2/(\text{元} \cdot \text{次}^{-1})$	20 000
$F_3/(\text{元} \cdot \text{次}^{-1})$	4 000
$F_4/(\text{元} \cdot \text{次}^{-1})$	2 000
W_1/d	2
W_2/d	0.5
W_3/d	0.2
Time/d	1 000

根据第 2.1 节所述建立退化模型,经过多次仿真计算,得到如表 2 所示的预测剩余寿命与真实寿命间的相对误差,结果表明相对误差均小于 0.3%,认为剩余寿命的预测结果达到要求。

表 2 预测剩余寿命与真实寿命间的相对误差

运行时刻/ d	预测剩余寿命/ d	真实寿命/ d	相对误差/ %
0	67.84	68	0.235
10	57.90	58	0.172
20	47.91	48	0.187
30	38.05	38	0.131
40	28.03	28	0.107
50	17.98	18	0.111

如图 3 所示为全寿命周期内真实寿命和预测剩余寿命 PDF 曲线分布,从图中可以看出,预测寿命接近真实寿命,

随着退化数据的多次检测,PDF 的曲线越来越高,剩余寿命估计的不确定性越来越小,与真实寿命越发接近。

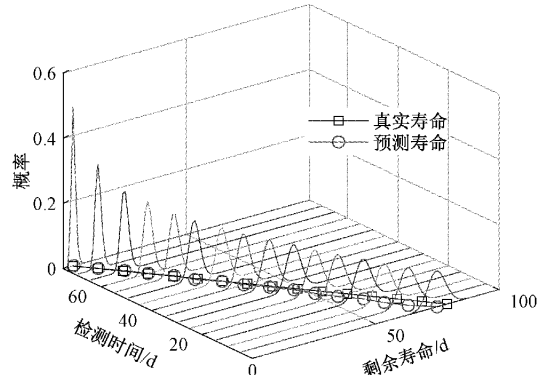


图 3 剩余寿命概率密度

在如上准确的剩余寿命预测值的情况下,对建立的视情维修策略进行蒙特卡洛仿真得到了如表 3 所示的不同维修阈值下的仿真数据。

表 3 不同维修阈值下的仿真数据

维修阈值/ (°/d)	事后维修 次数	完美维修 次数	非完美维修 次数	检测 次数	维修时长/ d	总费用/ 元	可用度	效费比/ (元/d)
7.90	0.01	4.48	15	29.48	5.26	209 060	0.994 74	210.168 60
7.94	0.01	4.23	14.99	29.01	5.133	203 080	0.994 87	204.129 99
7.98	0.04	4.06	14.97	28.42	5.104	199 920	0.994 90	200.948 52
8.02	0.04	3.99	14.96	28.67	5.067	198 980	0.994 93	199.996 09
8.06	0.08	3.99	14.93	28.69	5.141	200 900	0.994 86	201.943 78
8.10	0.19	3.96	14.81	26.99	5.322	201 920	0.994 68	203.013 99
8.14	0.13	3.99	14.85	28.63	5.225	202 960	0.994 78	204.034 44
8.18	0.19	3.97	14.7	29.69	5.305	205 080	0.994 70	206.185 36
8.22	0.23	3.95	14.66	28	5.367	205 140	0.994 63	206.258 77
8.26	0.29	3.93	14.44	28.07	5.433	207 000	0.994 57	208.152 96
8.30	0.43	3.82	14.22	27.55	5.614	209 880	0.994 39	211.092 88

如表 3 所示,随着维修阈值的减小,事后维修次数在逐渐减少,完美维修和非完美维修次数逐渐增加,效费比的趋势也从大变小再逐渐变大。在图 4 所示的不同维修阈值所对应的效费比柱状图中可以清楚看到这种变化趋势,当维修阈值设置为 8.02°/d 时,效费比达到最优,为 199.996 09 元/d,同时其可用度也达到最高 0.994 93。

此外,在维修费用、维修时长和任务周期时长保持一致的条件下,与传统的周期性能检测以及文献[6]所提出的动态检测等视情维修策略方法进行了对比分析,结果如表 4 所示。在其他的仿真条件中,周期检测策略 1 和 2 的检测周期为 17 d,维修阈值为 7.2°/d;周期检测策略 2 还对维修活动后性能检测的次数进行了限制,至多 4 次;动态检测策略的维修阈值为 8.18°/d。

如表 4 所示的实验数据对比可以看出,本文所提视情维修策略可以明显降低效费比,减少非必要的性能检测次

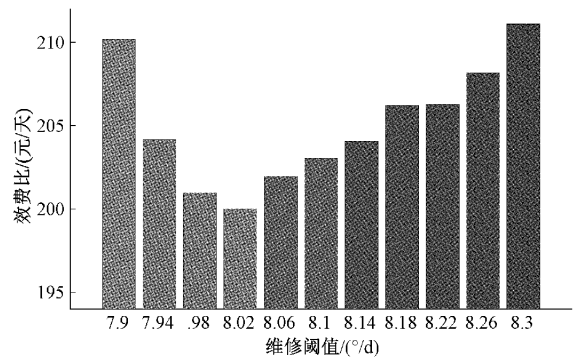


图 4 不同维修阈值下效费比

数和部件使用中事后维修的次数,有效降低维修检测成本,同时降低意外停机事故的发生,使得装备运行的安全性得到保障,装备保障资源利用的更加经济合理。

表4 文中视情维修策略最优解与其他维修策略
实验数据对比

维修策略	效费比/ (元/d)	事后 维修 次数	完美 维修 系数	非完美 维修 次数	检测 次数
周期检测策略1	271.973 60	0.4	3.86	13.74	59.15
周期检测策略2	254.560 62	0.22	3.92	13.86	51.36
动态检测策略	229.705 09	0.08	3.98	14.93	39.86
最优解	199.996 09	0.04	3.99	14.96	28.67

5 结 论

在基于维纳过程进行部件性能退化模型的建立时,考虑关键部件的事后维修和预防性维修(完美维修和非完美维修)活动,探究非完美维修活动对退化模型的初始退化量和退化率的双重影响,精确刻画部件退化的过程,并根据首达时间的概念得出剩余寿命的概率分布,实现对剩余寿命准确的预测;在此基础上开展视情维修,以效费比为约束条件,提出依靠剩余寿命的预测值作为时间间隔开展退化性能检测的方法;同时,通过蒙特卡洛循环仿真方法选取最佳维修阈值。最后,通过与传统周期性检测的视情维修策略进行仿真实验对比,效费比最优解可以达到199.996 09元/d,明显优于周期检测的视情维修策略,验证了本文所提方法可以减少事后维修的次数,降低检测成本,提高检测时间安排的灵活性,使得装备工作的安全性更高,维修保障资源利用更加高效经济。在后续的研究中,将进一步结合装备的系统结构,开展系统级的多部件联合视情维修策略的研究,为装备维修给出合理的预见性方案。

参考文献

- [1] 范世东,余慧芳. 关于船舶机械视情维修制度的认识[J]. 船海工程, 2001(5): 37-39.
- [2] 吴明辉,阮永贵,韩海舰. 机载设备视情维修及其决策建模分析[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(3): 27-31.
- [3] 景博,汤巍,黄以锋,等. 故障预测与健康管理系统相关标准综述[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(12): 1301-1307.
- [4] 葛恩顺,李庆民,张光宇,等. 考虑不完全维修的劣化系统最优视情维修策略[J]. 航空学报, 2013, 34(2): 316-324.
- [5] 杨立乾,赵金楼,李根. 基于性能退化的船舶关键部件视情维修策略[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2020, 41(4): 613-618.
- [6] 林名驰,唐政,宁明强,等. 基于 Wiener 过程的动态

性能检测视情维修策略[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(7): 40-45.

- [7] DO P, VOISIN A, LEVRAT E, et al. A proactive condition-based maintenance strategy with both perfect and imperfect maintenance actions [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2015, 133: 22-32.
- [8] CHEN C, LU N, JIANG B, et al. Condition-based maintenance optimization for continuously monitored degrading systems under imperfect maintenance actions [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2020, 31(4): 841-851.
- [9] LI X, RAN Y, WAN F, et al. Condition-based maintenance strategy optimization of meta-action unit considering imperfect preventive maintenance based on Wiener process [J]. Flexible Services and Manufacturing Journal, 2021: 1-30.
- [10] DH A. Exploring the optimal condition-based maintenance policy under the gamma degradation process [J]. Procedia Manufacturing, 2021, 55: 132-138.
- [11] LI J F, CHEN Y X, CAI Z Y, et al. A dynamic condition-based maintenance optimization model for mission-oriented system based on inverse Gaussian degradation process [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2022, 33(2): 474-488.
- [12] ROGER F. Safety constraints applied to an adaptive Bayesian condition-based maintenance optimization model[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2012, 102(2):16-26.
- [13] 裴洪,胡昌华,司小胜,等. 不完美维护下基于剩余寿命预测信息的设备维护决策模型[J]. 自动化学报, 2018, 44(4): 719-729.
- [14] 王书锋,王友仁,姜媛媛. Wiener 过程性能退化电子产品的剩余寿命预测方法[J]. 电子测量技术, 2014, 37(5): 17-20,41.
- [15] 孙曙光,王佳兴,王景芹,等. 基于 Wiener 过程的万能式断路器附件剩余寿命预测[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(2): 26-37.

作者简介

董正琼,博士,硕士生导师,讲师,主要研究方向为装备健康管理与智能运维。

E-mail: dongzhq@hbut.edu.cn

聂磊(通信作者),博士,研究生导师,教授,主要研究方向为电子制造工艺可靠性研究。

E-mail: leinie@hbut.edu.cn