

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

裴洪¹ 胡昌华¹ 司小胜¹ 张正新¹ 杜党波¹

摘要 基于剩余寿命预测信息进行设备维护决策的研究中, 现有方法通常仅考虑不完美维护对退化量或退化率的单一影响, 忽略了不完美维护对两者的双重影响. 鉴于此, 针对随机退化设备, 提出一种考虑不完美维护影响的性能退化模型与维护决策模型, 融合了维护活动对设备退化量和退化率的双重影响. 首先基于 Wiener 过程分阶段构建存在不完美维护干预的随机退化模型, 在首达时间的意义下推导出剩余寿命的解析概率分布; 然后基于剩余寿命的预测结果, 以检测间隔和预防性维护阈值为决策变量建立维护决策模型; 最后数值仿真实验验证了本文模型的有效性, 并对费用参数进行了敏感性分析. 实验结果表明本文模型具有潜在的工程应用价值.

关键词 不完美维护, Wiener 过程, 检测间隔, 预防性维护阈值

引用格式 裴洪, 胡昌华, 司小胜, 张正新, 杜党波. 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. 自动化学报, 2018, 44(4): 719–729

DOI 10.16383/j.aas.2017.c160534

Remaining Life Prediction Information-based Maintenance Decision Model for Equipment Under Imperfect Maintenance

PEI Hong¹ HU Chang-Hua¹ SI Xiao-Sheng¹ ZHANG Zheng-Xin¹ DU Dang-Bo¹

Abstract In making a maintenance decision for equipment based on remaining life prediction information, current methods normally consider that maintenance activities can only have influence on either the degradation level or the degradation rate, but not on both. In this paper a degradation model and a maintenance decision model considering the influence of imperfect maintenance for stochastic deteriorating equipment are proposed so as to combine the influences of imperfect maintenance activities on both degradation level and degradation rate. A stochastic degradation model subject to the intervention of imperfect maintenance is firstly established based on the multi-phase Wiener process, and the analytical probability distribution of the remaining life is derived in the sense of the first hitting time. Then, a maintenance decision model whose decision variables are the monitoring interval and the preventive maintenance threshold is constructed based on the remaining life prediction information. Finally, a numerical simulation is provided to substantiate the effectiveness of the proposed model and to analyze the sensitiveness of the cost parameters. The experiment result shows that the model has potential to be applied in practice.

Key words Imperfect maintenance, Wiener process, monitoring interval, preventive maintenance threshold

Citation Pei Hong, Hu Chang-Hua, Si Xiao-Sheng, Zhang Zheng-Xin, Du Dang-Bo. Remaining life prediction information-based maintenance decision model for equipment under imperfect maintenance. *Acta Automatica Sinica*, 2018, 44(4): 719–729

随着现代高新科技的快速发展, 航空航天和工业制造等领域的关键设备呈现出大规模和复杂化的趋势, 同时也对这类设备的可靠性和安全性提出了更苛刻的要求. 为确保关键设备安全稳定运行, 预测与健康管理的(Prognostics and health management,

PHM) 作为一门新兴技术受到了学术界和工业界的广泛关注^[1–2]. 视情维护 (Condition-based maintenance, CBM) 作为 PHM 的重要组成部分, 能够提高关键设备的安全性和可靠性, 降低失效事件发生的概率. 因而, CBM 成为当前研究的热点问题, 涌现出了大量的学术成果^[3–9].

根据修复程度不同, 通常将维护分为完美维护、不完美维护和小修^[10–11] 三类. 完美维护即设备的退化指标通过维护活动恢复至全新的状态, 适用于结构简单的设备; 小修即通过维护没有改善设备的退化状态, 适用于结构复杂的设备^[6]. 然而, 在工程实际中, 大部分维护活动均为不完美维护, 即设备的退化指标通过维护活动无法恢复至全新的状态, 只能恢复至修复如新和修复如旧之间的某一状态^[6, 10, 12], 例如为旋转部件喷洒润滑剂, 对陀螺仪力

收稿日期 2016-07-18 录用日期 2016-11-08
Manuscript received July 18, 2016; accepted November 8, 2016
国家自然科学基金 (61573365, 61773386, 61603398, 61374126, 61473094, 61573366), 中国科协青年人才托举工程 (2016QNRC001) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (61573365, 61773386, 61603398, 61374126, 61473094, 61573366) and Young Elite Scientists Sponsorship Program of China Association for Science and Technology (2016QNRC001)
本文责任编辑 文成林
Recommended by Associate Editor WEN Cheng-Lin
1. 火箭军工程大学控制工程系 西安 710025
1. Department of Automation Technology, Xi'an Institute of High Technology, Xi'an 710025

矩电流进行调整等. 因此, 相对于完美维护和小修, 不完美维护更具一般性. 不完美维护通常能够减缓设备的退化过程, 实现延寿的目的, 受到了学者们的普遍关注^[13-14].

现有文献中, 不完美维护的模型一般分为年龄减少模型、风险率增加模型及混合模型^[15]. Kijima 等基于虚拟年龄的概念提出年龄减少模型以描述不完美维护活动对设备的影响^[16]. Nakagawa 等从风险率的角度提出了风险率增加模型, 通过引入调节因子刻画风险率的变化趋势, 进而实现不完美维护模型的构建^[17]. Zhou 等通过融合这两类模型提出一种混合模型进一步改进了传统的不完美维护模型, 并在理论上验证了该模型的合理性^[18]. 上述不完美维护的模型分别从虚拟年龄和风险率的角度描述不完美维护影响, 忽略了实际运行过程中获取的性能退化数据, 难以保证维护决策的准确性. 随着传感技术的不断发展, 退化建模逐渐成为当前剩余寿命 (Remaining life, RL) 预测的主流方法^[19]. 国内外有关从退化角度描述不完美维护模型的研究较为匮乏, 亟需一种基于退化建模的不完美维护模型. Van 等考虑了不完美维护对退化量的影响, 认为不完美维护后退化量将减少一个随机量^[20]. Wang 等进一步研究这种影响, 提出一种带有负跳变的 Wiener 过程对维护活动干预下的设备 RL 进行预测, 但没有涉及维护决策的问题^[14]. Guo 等针对任务导向型设备, 基于 Wiener 退化过程构建出维护决策模型, 通过引入残余退化量的概念形象刻画出不完美维护对退化量的影响, 通过优化决策函数进而确定出最优预防性维护阈值^[4]. Zhang 等通过引入随机改善因子考虑了不完美维护对退化率的影响, 从退化率的角度提出一种新的不完美维护模型, 实现了陀螺仪的最优维护^[6]. 以上基于退化建模的不完美维护模型, 仅考虑不完美维护对退化量和退化率的单一影响, 忽略了对两者的双重影响. 一般而言, 经历不完美维护后, 设备的退化量与退化率均会发生变化. 因而为刻画不完美维护的影响, 在构建不完美维护模型时必须同时融入这两方面的变化.

鉴于此, 本文基于实际中普遍采用的定期检测策略, 提出一种考虑不完美维护活动影响的性能退化模型和维护决策模型, 融合维护活动对设备退化量和退化率的双重影响. 1) 基于 Wiener 过程分阶段构建存在不完美维护干预的随机退化模型, 在首达时间的意义下推导出 RL 的解析概率分布; 2) 基于 RL 的预测结果, 以检测间隔和预防性维护阈值为决策变量建立维护决策模型, 通过搜索方法求取检测间隔和预防性维护阈值, 从而最优实现工程设备的最优维护; 3) 数值仿真实验验证了本文模型的有效性, 并对费用参数进行敏感性分析.

1 问题描述与模型假设

1.1 问题描述

对于关键工程设备而言, 通过状态监测技术能够获得设备当前的退化水平, 将获取的退化水平与预防性维护阈值进行比较从而指导维护活动, 当其超出预防性维护阈值时进行预防性维护活动. 在实际工程中, 预防性维护一方面会改善设备的退化状态, 可用残余退化量刻画; 另一方面将加快设备的退化速度. 需要强调的是, 本文提到的预防性维护均指不完美维护. 为了保证设备的运行可靠性和经济可承受性, 工程实际中通常会限制预防性维护的次数 N . 当设备经历 N 次预防性维护后, 若其退化水平达到了预先设定的失效阈值 w , 意味着设备发生失效, 为了避免财产损失和事故发生, 在达到了失效阈值前需要对设备进行预防性替换, 如图 1 所示.

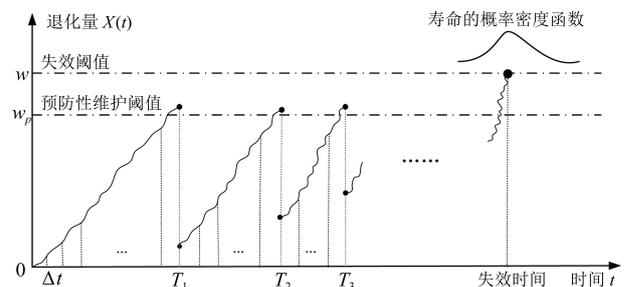


图 1 不完美维护干预下的设备退化轨迹

Fig. 1 Degradation trajectory under the influence of imperfect maintenance

针对上述维护活动干预下的设备退化过程, 检测间隔 Δt 与预防性维护阈值 w_p 不仅影响设备的安全性和可靠性, 同时对设备的运行成本也有一定影响. 一方面, 检测间隔过大时, 无法准确获取设备退化水平的变化情况, 贻误了最佳维护和替换时机, 难以保证设备的安全性和可靠性. 另一方面, 采取较小的检测周期便于掌握设备退化状态变化情况, 但对于检测成本较高的设备, 频繁的检测将引起设备运行费用的提高, 造成人力与物力的浪费. 相似地, 当预防性维护阈值过低时, 设备的安全性和可靠性得到了有力保障, 但频繁的维护缩短了设备的运行时间, 无法保证工程实际中的任务完成率; 当预防性维护阈值过高时, 设备运行过程中的安全性和可靠性难以得到保证. 因此, 合理的检测间隔和预防性维护阈值能够实现设备的最优维护, 在维护决策领域发挥着举足轻重的作用.

基于上述分析, 本文主要研究以下内容:

1) 如何基于 Wiener 过程分阶段对考虑不完美维护活动影响的设备进行退化建模;

2) 如何基于退化模型在首达时间意义下进行 RL 预测;

3) 如何基于 RL 预测结果构建维护决策模型以及在维护决策模型基础上确定最优检测间隔和预防性维护阈值.

1.2 模型假设

1) 设备经历的检测活动是定期的且完美的, 能够完全反映设备退化水平, 单次检测费用为 C_i , 检测间隔为 Δt , 检测所需时间可忽略不计;

2) 设备经历的预防性维护活动是不完美的, 且对退化量与退化率有着双重影响;

3) 若检测到设备的退化量超出失效阈值 w 时, 设备需要进行失效性替换, 相应费用为 C_f , 替换所需时间可忽略不计;

4) 若检测到设备的退化量介于预防性维护阈值 w_p 与失效阈值 w 之间时, 设备需要进行预防性维护, 相应费用为 C_p , 维护所需时间可忽略不计;

5) 若检测到设备的退化量低于预防性维护阈值 w_p , 设备继续运行, 不需要进行任何维护活动;

6) 当设备经历 N 次预防性维护后, 若在设备发生失效前进行替换活动, 即预防性替换, 相应费用为 C_r .

2 基于 Wiener 过程的退化建模和 RL 预测

基于 Wiener 过程的退化模型是一类常见的随机退化模型, 广泛应用于设备腐蚀、机械磨损等实际退化过程中^[4, 6, 14, 21-22]. 本文采用 Wiener 过程对考虑维护活动影响的设备进行退化建模和 RL 分析, 即基于 Wiener 过程分阶段对退化过程进行建模, 经过 i 次维护活动后进入寿命周期的第 $i+1$ 阶段, 设备退化量可表示为^[21-22]

$$X(t) = z_i + \lambda_i(t - T_i) + \sigma_B B(t - T_i) \quad (1)$$

其中, $X(t)$ 为设备在 t 时刻的退化量, i ($0 \leq i \leq N$) 为 t 时刻前设备已经历的维护次数, N 为预防性维护的总数, z_i 为第 i 次维护后的残余退化量, 刻画维护活动对退化量的影响, 假设其概率密度函数满足^[4]

$$f(z_i) = \frac{a^{i-1}b}{1 - \exp(-ba^{i-1})w_p} \times \exp\left[-\frac{a^{i-1}b(w_p - z_i)}{w_p}\right] \mathbb{I}(z_i) \quad (2)$$

其中, a, b 为超参数, $\mathbb{I}(z_i)$ 为示值函数, 且有

$$\mathbb{I}(z_i) = \begin{cases} 1, & z_i \in [0, w_p] \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

其中, w_p 为预防性维护阈值, 一般由工业标准和专家经验确定, 且有 $z_0 = 0$. λ_i 为第 i 次维护后漂移系数, 刻画维护活动对退化率的影响, 且 $\lambda_i = (i+1)\lambda_0$, λ_0 为未进行维护时的漂移系数. 值得注意的是, 退化率的本质为退化量的一阶导数. T_i 为第 i 次维护时刻, σ_B 为扩散系数, $B(\times)$ 为标准布朗运动.

基于首达时间的概念, 在第 i 次预防性维护后残余退化量 z_i 给定的情况下, 设备的退化量首达预防性维护阈值 w_p 的时间 R_{i,w_p} 及首达失效阈值 w 的时间 $R_{i,w}$ 可定义为

$$R_{i,w_p} = \inf(r_i | X(T_i + r_i) \geq w_p | z_i, r_i > 0) \quad (4)$$

$$R_{i,w} = \inf(r_i | X(T_i + r_i) \geq w | z_i, r_i > 0) \quad (5)$$

根据文献 [4, 21], 能够进一步得到两类首达时间 R_{i,w_p} 和 $R_{i,w}$ 的概率密度函数 (Probability density function, PDF) 和累积分布函数 (Cumulative distribution function, CDF).

$$f_{i,w_p}(r_i | z_i) = \frac{w_p - z_i}{\sqrt{2\pi r_i^3 \sigma_B^2}} \exp\left[-\frac{(w_p - z_i - \lambda_i r_i)^2}{2r_i \sigma_B^2}\right] \quad (6)$$

$$f_{i,w}(r_i | z_i) = \frac{w - z_i}{\sqrt{2\pi r_i^3 \sigma_B^2}} \exp\left[-\frac{(w - z_i - \lambda_i r_i)^2}{2r_i \sigma_B^2}\right] \quad (7)$$

$$F_{i,w_p}(r_i | z_i) = P\{R_{i,w_p} < r_i | z_i\} = \Phi\left(\frac{-(w_p - z_i) + \lambda_i r_i}{\sqrt{r_i \sigma_B^2}}\right) + \exp\left(\frac{2\lambda_i(w_p - z_i)}{\sigma_B^2}\right) \times \Phi\left(\frac{-(w_p - z_i) - \lambda_i r_i}{\sqrt{r_i \sigma_B^2}}\right) \quad (8)$$

$$F_{i,w}(r_i | z_i) = P\{R_{i,w} < r_i | z_i\} = \Phi\left(\frac{-(w - z_i) + \lambda_i r_i}{\sqrt{r_i \sigma_B^2}}\right) + \exp\left(\frac{2\lambda_i(w - z_i)}{\sigma_B^2}\right) \times \Phi\left(\frac{-(w - z_i) - \lambda_i r_i}{\sqrt{r_i \sigma_B^2}}\right) \quad (9)$$

3 维护决策模型与求解

为了评估维护策略的性能, 本文选择长期期望

维护费用率函数作为主要指标对维护策略进行性能分析. 具体地, 以检测间隔与预防性维护阈值为决策变量, 最小化长期期望维护费用率函数为准则, 根据更新报酬理论, 维护决策模型表示为^[3]

$$\min E(\Delta t, w_p) = \frac{EU}{EV} \quad (10)$$

其中, EU 为设备寿命周期内的运行总费用, 包含预防性维护费用、检测费用、预防性替换费用和失效性替换费用, EV 为设备寿命周期的期望.

基于上述分析, EU 可进一步表示为

$$EU = C_i E(N_i) + C_p E(N_p) + C_r P_r(\Delta t, w_p) + C_f P_f(\Delta t, w_p) \quad (11)$$

其中, C_i 为检测费用, C_p 为预防性维护费用, C_r 为预防性替换费用, C_f 为失效性替换费用, 且 $C_i < C_p < C_r < C_f$. $E(N_i)$ 为检测次数的期望值, $E(N_p)$ 为预防性维护次数的期望值, $P_r(\Delta t, w_p)$ 为设备进行预防性替换的概率, $P_f(\Delta t, w_p)$ 为设备进行失效性替换的概率.

设备寿命周期的终结通常分为两种情形: 1) 预防性替换引起寿命周期的计划终止; 2) 失效性替换引起设备寿命周期的意外终止.

3.1 预防性替换

设备进行预防性替换的过程如图 2 所示.

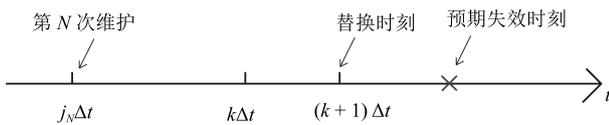


图 2 预防性替换过程

Fig. 2 Process of the preventive replacement

从图 2 可以看出, 设备进行预防性替换需要满足两个前提条件: 1) 设备进行了 N 次预防性维护; 2) 失效前对设备进行更换. 假定预防性替换时刻为 $(k+1)\Delta t$ ($k \geq N$), 预防性替换活动通过对设备进行更换进而保证设备运行的安全性和可靠性, 且第 i ($1 \leq i \leq N$) 次预防性维护时刻为 $j_i \Delta t$. 由于预防性维护时刻 $j_i \Delta t$ 具有随机性, 因而为确定此时刻进行预防性维护的概率 $P(j_i)$, 给出如下定理.

定理 1. 对于不完美维护活动干预的随机退化设备, 在 $j_i \Delta t$ ($i \in [1, N], i \in \mathbf{N}^+$) 时刻进行预防性维护的概率 $P(j_i)$ 能够表示为

$$P(j_i) = \int_0^{w_p} \left\{ (1 - F_{i-1, w_p}((j_i - j_{i-1} - 1)\Delta t | z_{i-1})) \times \right.$$

$$\left. \int_{z_{i-1}}^{w_p} f_{i-1, \phi}(x; (j_i - j_{i-1} - 1)\Delta t) \times (F_{i-1, w_p-x}(\Delta t, x | z_{i-1}) - F_{i-1, w-x}(\Delta t, x | z_{i-1})) dx \right\} f(z_{i-1}) dz_{i-1} \quad (12)$$

其中,

$$f_{i, \phi}(x; t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_B^2 t}} \exp\left[-\frac{(x - z_i - \lambda_i t)^2}{2\sigma_B^2 t}\right]$$

$$f_{i, w_p-x}(\delta, x | z_i) = \frac{w_p - x}{\sqrt{2\pi\sigma_B^2 \delta^3}} \exp\left[-\frac{(w_p - x - \lambda_i \delta)^2}{2\sigma_B^2 \delta}\right]$$

$$f_{i, w-x}(\delta, x | z_i) = \frac{w - x}{\sqrt{2\pi\sigma_B^2 \delta^3}} \exp\left[-\frac{(w - x - \lambda_i \delta)^2}{2\sigma_B^2 \delta}\right]$$

$$F_{i, w_p-x}(\delta, x | z_i) = \Phi\left(\frac{-(w_p - x) + \lambda_i \delta}{\sqrt{\delta\sigma_B^2}}\right) + \exp\left(\frac{2\lambda_i(w_p - x)}{\sigma_B^2}\right) \Phi\left(\frac{-(w_p - x) - \lambda_i \delta}{\sqrt{\delta\sigma_B^2}}\right)$$

$$F_{i, w-x}(\delta, x | z_i) = \Phi\left(\frac{-(w - x) + \lambda_i \delta}{\sqrt{\delta\sigma_B^2}}\right) + \exp\left(\frac{2\lambda_i(w - x)}{\sigma_B^2}\right) \Phi\left(\frac{-(w - x) - \lambda_i \delta}{\sqrt{\delta\sigma_B^2}}\right)$$

证明. 在 $j_i \Delta t$ 时刻进行预防性维护, 即 $(j_i - 1)\Delta t$ 的退化量 $X((j_i - 1)\Delta t)$ 低于预防性维护阈值 w_p , 且 $j_i \Delta t$ 的退化量 $X(j_i \Delta t)$ 介于预防性维护阈值 w_p 和失效阈值 w 之间, 因而, $j_i \Delta t$ 时刻进行预防性维护的概率 $P(j_i)$ 可进一步表示为

$$P(j_i) = P\left(X((j_i - 1)\Delta t) < w_p \cap w_p \leq X(j_i \Delta t) < w\right) = P\left(X((j_i - 1)\Delta t) < w_p \cap X(j_i \Delta t) \geq w_p\right) - P\left(X((j_i - 1)\Delta t) < X(j_i \Delta t) \geq w\right) = w_p \cap P\left(X((j_i - 1)\Delta t) < w_p \cap \right.$$

$$\begin{aligned}
& X(\Delta t) \geq \\
& w_p - X((j_i - 1)\Delta t) \Big) - \\
& P\left(X((j_i - 1)\Delta t) < \right. \\
& X(\Delta t) \geq w_p \cap \\
& \left. w - X((j_i - 1)\Delta t)\right) \quad (13)
\end{aligned}$$

值得注意的是, 式 (13) 的推导利用了 Wiener 过程的独立增量特性, 即 $X(j_i\Delta t) - X((j_i - 1)\Delta t) = X(\Delta t)$. 在不考虑残余退化量 z_{i-1} 随机性的情况下, 同时基于独立事件的相关知识, 则 $j_i\Delta t$ 时刻进行预防性维护的条件概率 $P(j_i|z_{i-1})$ 可表示为

$$\begin{aligned}
P(j_i|z_{i-1}) &= P\left(X((j_i - 1)\Delta t) < w_p \cap \right. \\
& X(\Delta t) \geq w_p - X((j_i - 1)\Delta t) \Big| z_{i-1}) - \\
& P\left(X((j_i - 1)\Delta t) < w_p \cap X(\Delta t) \geq w - \right. \\
& X((j_i - 1)\Delta t) \Big| z_{i-1}) = P\left(X((j_i - 1)\Delta t) < \right. \\
& w_p \Big| z_{i-1}) \times P\left(X(\Delta t) \geq w_p - \right. \\
& X((j_i - 1)\Delta t) \Big| z_{i-1}) - \\
& P\left(X((j_i - 1)\Delta t) < w_p \Big| z_{i-1}) \times \right. \\
& \left. P\left(X(\Delta t) \geq w - X((j_i - 1)\Delta t) \Big| z_{i-1}\right) \quad (14)
\end{aligned}$$

考虑 $(j_i - 1)\Delta t$ 时刻退化量 $X((j_i - 1)\Delta t)$ 的随机性, 式 (14) 中的几项概率为

$$\begin{aligned}
P\left(X((j_i - 1)\Delta t) < w_p \Big| z_{i-1}\right) &= \\
& \int_{(j_i - j_{i-1} - 1)\Delta t}^{\infty} f_{i-1, w_p}(r_{i-1} | z_{i-1}) dr_{i-1} = \\
& 1 - F_{i-1, w_p}((j_i - j_{i-1} - 1)\Delta t | z_{i-1}) \quad (15)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
P\left(X(\Delta t) \geq w_p - X((j_i - 1)\Delta t) \Big| z_{i-1}\right) &= \\
& \int_0^{\Delta t} \int_{z_{i-1}}^{w_p} f_{i-1, \phi}(x; (j_i - j_{i-1} - 1)\Delta t) \times \\
& f_{i-1, w_p - x}(\delta, x | z_{i-1}) d\delta dx = \\
& \int_{z_{i-1}}^{w_p} f_{i-1, \phi}(x; (j_i - j_{i-1} - 1)\Delta t) \times \\
& F_{i-1, w_p - x}(\Delta t, x | z_{i-1}) dx \quad (16)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
P\left(X(\Delta t) \geq w - X((j_i - 1)\Delta t) \Big| z_{i-1}\right) &= \\
& \int_0^{\Delta t} \int_{z_{i-1}}^{w_p} f_{i-1, \phi}(x; (j_i - j_{i-1} - 1)\Delta t) \times \\
& f_{i-1, w - x}(\delta, x | z_{i-1}) d\delta dx =
\end{aligned}$$

$$\int_{z_{i-1}}^{w_p} f_{i-1, \phi}(x; (j_i - j_{i-1} - 1)\Delta t) \times F_{i-1, w - x}(\Delta t, x | z_{i-1}) dx \quad (17)$$

将式 (15) ~ (17) 分别代入式 (14), 可得 $j_i\Delta t$ 时刻进行预防性维护的条件概率 $P(j_i | z_{i-1})$.

$$\begin{aligned}
P(j_i | z_{i-1}) &= \\
& (1 - F_{i-1, w_p}((j_i - j_{i-1} - 1)\Delta t | z_{i-1})) \times \\
& \int_{z_{i-1}}^{w_p} f_{i-1, \phi}(x; (j_i - j_{i-1} - 1)\Delta t) \times \\
& \left(F_{i-1, w_p - x}(\Delta t, x | z_{i-1}) - \right. \\
& \left. F_{i-1, w - x}(\Delta t, x | z_{i-1}) \right) dx \quad (18)
\end{aligned}$$

根据全概率公式, $j_i\Delta t$ 时刻进行预防性维护的概率 $P(j_i)$ 可表示为

$$\begin{aligned}
P(j_i) &= \int_0^{w_p} P(j_i | z_{i-1}) \cdot f(z_{i-1}) dz_{i-1} = \\
& \int_0^{w_p} \left\{ (1 - F_{i-1, w_p}((j_i - j_{i-1} - 1)\Delta t | z_{i-1})) \times \right. \\
& \int_{z_{i-1}}^{w_p} f_{i-1, \phi}(x; (j_i - j_{i-1} - 1)\Delta t) \times \\
& \left(F_{i-1, w_p - x}(\Delta t, x | z_{i-1}) - \right. \\
& \left. F_{i-1, w - x}(\Delta t, x | z_{i-1}) \right) dx \Big\} \times f(z_{i-1}) dz_{i-1} \quad (19)
\end{aligned}$$

□

基于上述描述, 设备在 $(k + 1)\Delta t$ ($k \geq N$) 进行预防性替换之前, 经历了 N 次预防性维护, 这些维护不仅自身相互独立而且与维护后的替换活动相互独立. 假定设备在 $k\Delta t$ 时刻的退化量为 $X(k\Delta t)$, 在 $(k + 1)\Delta t$ 时刻的退化量为 $((k + 1)\Delta t)$, 根据上述定理的结论, 设备在 $(k + 1)\Delta t$ ($k \geq N$) 进行预防性替换概率 $P_r(k + 1, N)$ 可表示为

$$\begin{aligned}
P_r(k + 1, N) &= \\
& \sum_{j_1=1}^{k-N+1} \sum_{j_2=j_1+1}^{k-N+2} \cdots \sum_{j_N=j_{N-1}+1}^k \left[\prod_{i=1}^N P(j_i) \times \right. \\
& P\left(X(k\Delta t) < w_p \cap w_p \leq \right. \\
& \left. X((k + 1)\Delta t) < w\right) \Big] = \\
& \sum_{j_1=1}^{k-N+1} \sum_{j_2=j_1+1}^{k-N+2} \cdots \sum_{j_N=j_{N-1}+1}^k \left[\prod_{i=1}^N P(j_i) \times
\end{aligned}$$

$$\int_0^{w_p} \left\{ (1 - F_{N,w_p}((k - j_N) \Delta t | z_N)) \times \int_{z_N}^{w_p} f_{N,\phi}(x; (k - j_N) \Delta t) \times (F_{N,w_p-x}(\Delta t, x | z_N) - F_{N,w-x}(\Delta t, x | z_N)) dx \right\} \times f(z_N) dz_N \quad (20)$$

设备在 N 次预防性维护后进行预防性替换的概率 $P_r(\Delta t, w_p)$ 为

$$P_r(\Delta t, w_p) = \sum_{k=N}^{\infty} P_r(k + 1, N) \quad (21)$$

3.2 失效性替换

根据概率论中对立事件的关系, 设备进行失效性替换的概率可表示为

$$P_f(\Delta t, w_p) = 1 - P_r(\Delta t, w_p) = 1 - \sum_{k=N}^{\infty} P_r(k + 1, N) \quad (22)$$

具体地, 由于设备性能退化的随机性, 设备在寿命周期内的任何阶段内均有可能发生失效, 失效后进行的替换活动均为失效性替换. 假定设备在 $(k\Delta t, (k + 1)\Delta t]$ 发生失效, 根据失效前经历维护活动的次数, 将失效性替换分为两种情况.

1) 设备失效前未进行预防性维护活动. 如图 3(a) 所示, 设备在寿命周期的第一阶段内, 即第一次预期维护前突发失效, 通过状态检测技术失效状态会在下一个检测时刻 $(k + 1)\Delta t$ 发现, 进而对设备进行更换, 实现寿命周期的交替循环.

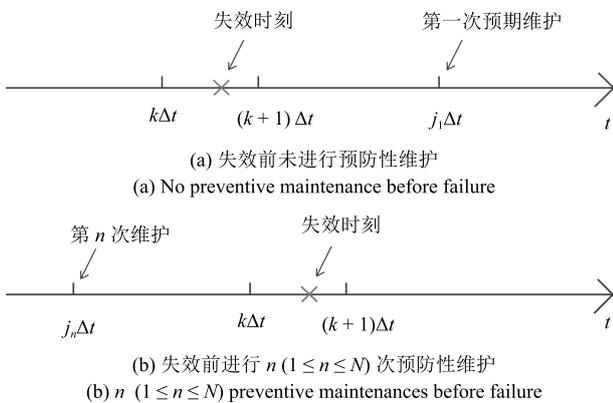


图 3 预防性替换过程

Fig. 3 Process of the preventive maintenance

设备失效前未进行预防性维护活动意味着预防性维护活动无法在延寿方面发挥作用, 等价于在设备寿命周期的第一阶段内在 $k\Delta t$ 时刻的退化量

$X(k\Delta t)$ 小于预防性维护阈值 w_p , 在 $(k + 1)\Delta t$ 时刻的退化量 $X((k + 1)\Delta t)$ 大于失效阈值 w , 则设备在失效前未进行预防性维护活动的概率 $P_f(k + 1, 0)$ 可表示为

$$P_f(k + 1, 0) = P(X(k\Delta t) < w_p \cap X((k + 1)\Delta t) > w) = P(X(k\Delta t) < w_p \cap X((k + 1)\Delta t) - X(k\Delta t) > w - X(k\Delta t)) = \int_{k\Delta t}^{\infty} f_{0,w_p}(r_0) dr_0 \times \int_0^{\Delta t} \int_0^{w_p} f_{0,\phi}(x; k\Delta t) \times f_{0,w-x}(\delta, x) d\delta dx = (1 - F_{0,w_p}(k\Delta t)) \times \int_0^{w_p} f_{0,\phi}(x; k\Delta t) \times F_{0,w-x}(\Delta t, x) dx \quad (23)$$

其中,

$$f_{0,\phi}(x; t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_B^2 t}} \exp\left[-\frac{(x - \lambda_0 t)^2}{2\sigma_B^2 t}\right]$$

$$f_{0,w-x}(\delta, x) = \frac{w - x}{\sqrt{2\pi\sigma_B^2 \delta^3}} \exp\left[-\frac{(w - x - \lambda_0 \delta)^2}{2\sigma_B^2 \delta}\right]$$

$$F_{0,w-x}(\delta, x) = \Phi\left(\frac{-(w - x) + \lambda_0 \delta}{\sqrt{\delta\sigma_B^2}}\right) + \exp\left(\frac{2\lambda_0(w - x)}{\sigma_B^2}\right) \Phi\left(\frac{-(w - x) - \lambda_0 \delta}{\sqrt{\delta\sigma_B^2}}\right)$$

2) 设备失效前进行了 n ($1 \leq n \leq N$) 次预防性维护. 如图 3(b) 所示, 设备经历 n 次预防性维护后进入在寿命周期第 $n + 1$ 阶段, 此时设备在 $(k\Delta t, (k + 1)\Delta t]$ 区间突发失效, 由于预防性维护次数 $n > 0$, 意味着预防性维护活动在延寿方面发挥了作用. 基于定理 1, 则设备在失效前进行 n ($1 \leq n \leq N$) 次预防性维护的概率为

$$P_f(k + 1, n) = \sum_{j_1=1}^{k-n+1} \sum_{j_2=j_1+1}^{k-n+2} \cdots \sum_{j_n=j_{n-1}+1}^k \left[\prod_{i=1}^n P(j_i) \times P(X(k\Delta t) < w_p \cap X((k + 1)\Delta t) > w) \right] = \sum_{j_1=1}^{k-n+1} \sum_{j_2=j_1+1}^{k-n+2} \cdots \sum_{j_n=j_{n-1}+1}^k \left[\prod_{i=1}^n P(j_i) \times \right]$$

$$\int_0^{w_p} \left\{ (1 - F_{n,w_p}((k - j_n) \Delta t | z_n)) \times \int_{z_n}^{w_p} f_{n,\phi}(x; (k - j_n) \Delta t) \times F_{n,w-x}(\Delta t, x | z_n) dx \right\} \times f(z_n) dz_n \quad (24)$$

通过以上分析, 能够得到维护决策模型的相关参数, 其他参数 ($EV, E(N_i), E(N_p)$) 可基于上述参数推导得到

$$EV = \sum_{k=n}^{\infty} \left[\sum_{n=0}^N (k + 1) \Delta t P_f(k + 1, n) \right] + \sum_{k=N}^{\infty} [(k + 1) \Delta t P_r(k + 1, N)]$$

$$E(N_i) = \frac{EV}{\Delta t}$$

$$E(N_p) = \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{n=0}^N n P_f(k + 1, n) + \sum_{k=N}^{\infty} N P_r(k + 1, N)$$

EV 表示设备寿命周期的期望, 由于预防性替换与失效性替换的替换时刻均为 $(k + 1)\Delta t$ ($k \geq N$), 根据概率统计知识可得寿命周期的期望值; $E(N_i)$ 表示检测次数的期望值, 由于检测间隔为 Δt , 根据设备寿命周期的期望与检测间隔的比值即可得出检测次数的期望值; $E(N_p)$ 表示预防性维护次数的期望值, 与寿命周期的期望计算过程相似, 同样可根据概率统计相关知识得到预防性维护次数的期望值.

将上述参数代入式 (10) 定义的维护决策模型中, 利用 MATLAB 软件通过搜索的方法寻求最优的检测间隔和预防性维护阈值, 并进行敏感度分析, 研究费用参数对最小长期期望维护费用率的影响.

4 仿真实验

本节通过仿真实验对本文模型的有效性和优越性进行验证, 确定最优的检测间隔和预防性维护阈值, 实现工程实际中的最优维护, 同时对相关费用参数的敏感性进行系统分析. 在实验中, 将本文模型记为模型 1, 将文献 [4] 模型记为模型 2, 通过对比两种模型得出最优长期期望维护费用率, 实现两种模型比较.

4.1 参数设置

假定设备的退化过程服从式 (1) 定义的 Wiener 过程, 其中, 未进行维护时的漂移系数 λ_0 和扩散系

数 σ_B 分别设为 0.3 和 0.2, 残余退化量的参数 (a, b) 设为 0.2 和 0.001. 以周期 Δt 对设备的退化量进行定期检测, 单位为小时, 当检测到设备当前退化量超出失效阈值 $w = 10$ 时, 意味着设备发生失效而停机, 此时必须进行失效性替换; 当检测到退化量介于失效阈值 w 与预防性维护阈值 w_p 之间时, 应立即采取预防性维护以保证设备运行可靠性, 经过 $N = 3$ 次预防性维护后, 当退化量再次超出预防性维护阈值 w_p 且未发生故障时, 立即进行预防性替换. 基于式 (10), 为得到长期期望维护费用率, 需要给定检测、预防性维护与预防性替换等相关费用, 相关费用参数可参考表 1.

表 1 相关费用参数
Table 1 Cost parameters

参数	C_i	C_p	C_r	C_f
费用 (/元)	5	50	200	500

4.2 结果分析与讨论

参数设置完成后, 基于模型 1 中的各参数, 能够得出设备进行预防性替换的概率 $P_r(\Delta t, w_p)$, 设备进行失效性替换的概率 $P_f(\Delta t, w_p)$, 监测次数的期望值 $E(N_i)$, 预防性维护次数的期望值 $E(N_p)$ 和设备寿命周期的期望 EV , 将所得结果代入式 (10), 得到长期期望维护费用率 $E(\Delta t, w_p)$. 为研究费用率函数与两类决策变量间的关系, 利用多维搜索的方法描绘出模型 1 费用率的函数图像, 如图 4 所示. 从图 4 可以看出, 当 $\Delta t = 0.5$ 小时且 $w_p = 9$ 时, 长期期望维护费用率达到最小, 最小值为 13.02 元/小时, 即实现工程实际中的最优维护.

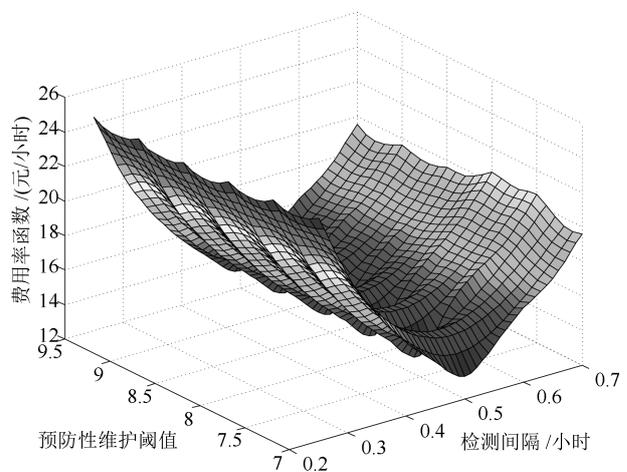


图 4 模型 1 的决策变量与长期期望维护费用率的关系
Fig.4 Relationship between the decision variables of model 1 and long term expected maintenance cost rate

对于模型 2, 为研究预防性维护阈值与长期期望维护费用率的关系, 需要固定检测间隔 Δt , 这里设定检测间隔 $\Delta t = 0.45$ 小时. 由于模型 2 仅有一个决策变量, 能够较为方便地通过搜索方法确定最优预防性维护阈值. 预防性维护阈值与长期期望维护费用率的关系如图 5 所示. 从图 5 可以看出, 当 $w_p < 9$ 时, 长期期望维护费用率随着预防性阈值的增加单调递减; 当 $w_p > 9$ 时, 长期期望维护费用率随着预防性阈值的增加单调递增; 当 $w_p = 9$ 时, 长期期望维护费用率最小, 最小值为 14.31 元/小时.

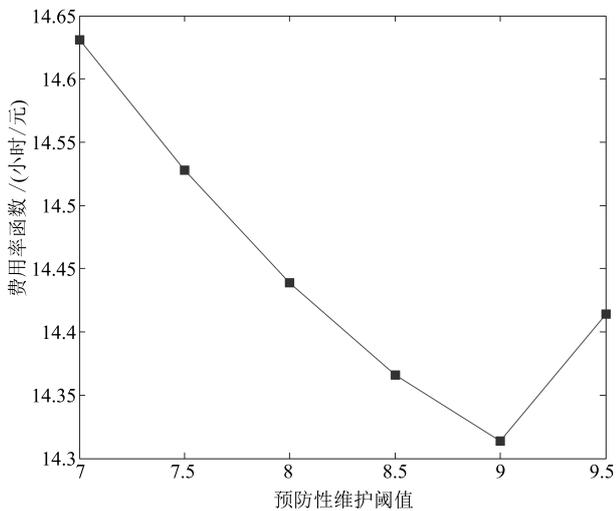


图 5 模型 2 的决策变量与长期期望维护费用率的关系
Fig. 5 Relationship between the decision variables of model 2 and long term expected maintenance cost rate

通过对比图 4 与图 5 能够发现, 模型 1 得出的最优长期期望维护费用率明显小于模型 2 得出的最优长期期望维护费用率, 主要原因是模型 1 优化了维护决策模型中的两个决策变量, 而模型 2 仅优化了维护决策模型中的一个决策变量. 验证了本文模型的有效性与优越性.

下面重点研究本文模型的最优维护策略对维护费用参数的敏感性.

为分析最优维护策略对维护费用参数的敏感性, 本文基于固定变量法研究某种费用参数与长期期望维护费用率的关系. 首先研究检测费用 C_i 对最优维护策略与最优长期期望维护费用率的影响. 为方便研究, 本文假定检测费用 C_i 满足 $1 \text{ 元} \leq C_i \leq 50 \text{ 元}$, 其他费用参数固定不变, 对于不同的检测费用, 通过上述维护决策模型, 能够得到不同的最优维护策略及最优长期期望维护费用率, 如图 6 所示.

从图 6 能够看出, 对于最优长期期望维护费用率而言, 当检测费用 C_i 从 1 元变化至 50 元, 最优长期期望维护费用率从 12 元/小时线性变化至 24.4 元/小时, 意味着检测费用 C_i 每增加 1 元, 最优长期

期望维护费用率增加约 0.25 元/小时, 由于最优长期期望维护费用率在整个区间内始终保持这种线性变化关系, 因而最优长期期望维护费用率受到检测费用的影响最为明显. 对于检测间隔而言, 随着检测费用的变化, 检测间隔分别在 $C_i = 6, 12, 34, 45$ 元附近有明显的上升, 每次上升约 0.05 小时, 检测间隔在检测费用的大部分区间内均保持恒定, 因而检测间隔受到检测费用的影响较为明显. 检测间隔上升的主要原因是当检测费用较低时, 频繁的检测能够及时掌握设备的退化状态, 保证设备的运行可靠性, 降低设备的失效风险, 因而此时最优检测间隔较短; 随着检测费用的增长, 频繁的检测将导致检测成本的上升, 因而检测间隔随之提高. 对于预防性维护阈值而言, 随着检测费用的变化, 预防性维护阈值仅在 $C_i = 17, 34$ 元附近有明显的下降, 第一次下降约 0.2 元, 第二次下降约 0.1 元, 预防性维护阈值在检测费用的大部分区间内均保持恒定, 因而预防性维护阈值受到检测费用的影响相对最小, 即预防性维护阈值对检测费用的敏感性最差, 总体上会略微下降, 以降低设备失效的概率.

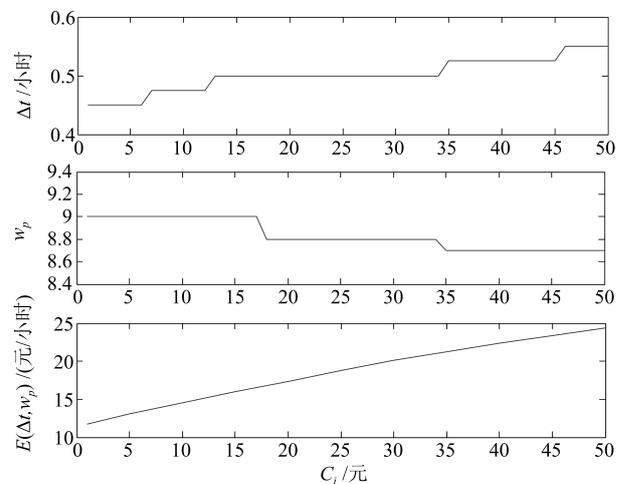


图 6 检测费用与最优维护策略及最优长期期望维护费用率的关系
Fig. 6 Relationship between preventive maintenance cost and maintenance policy with the optimal long term expected maintenance cost rate

图 7 给出了预防性维护费用与最优维护策略及最优长期期望维护费用率的关系, 假定预防性维护费用 C_p 满足 $5 \text{ 元} \leq C_p \leq 180 \text{ 元}$, 其他参数固定不变. 从图 7 可以看出, 对于最优长期期望维护费用率而言, 当预防性维护费用 C_p 从 5 元变化至 130 元, 最优长期期望维护费用率从 8.93 元/小时线性变化至 17.51 元/小时, 意味着预防性维护费用 C_p 每增加 1 元, 最优长期期望维护费用率增加约 0.069 元/小时; 当 $C_p \geq 130$ 元时, 最优长期期望维护费用

率基本保持恒定, 与文献 [23] 中的结果相一致. 由于最优长期期望维护费用率在预防性维护费用的大部分区间内均保持上述线性变化关系, 因而最优长期期望维护费用率受到预防性维护费用的影响最为明显. 对于预防性维护阈值而言, 随着预防性维护费用的变化, 预防性维护阈值分别在 $C_p = 20, 53, 84, 129$ 元附近有明显的上升, 每次上升约 0.2 元, 预防性维护阈值在预防性维护费用的大部分区间内均保持恒定, 因而预防性维护阈值受到预防性维护费用的影响较为明显. 预防性维护阈值上升的主要原因是当预防性维护费用较低时, 较低的预防性维护阈值可提高维护的频率, 保证了设备运行的安全性与可靠性; 随着预防性维护费用的增长, 频繁的维护将导致维护成本的上升, 因而预防性维护阈值随之提高. 对于检测间隔而言, 随着预防性维护费用的变化, 检测间隔仅在 $C_p = 20$ 元附近上升至 0.5 小时, 之后一直保持在 0.5 小时不变, 因而检测间隔受到预防性维护费用的影响相对最小, 即检测间隔对预防性维护费用的敏感性最差.

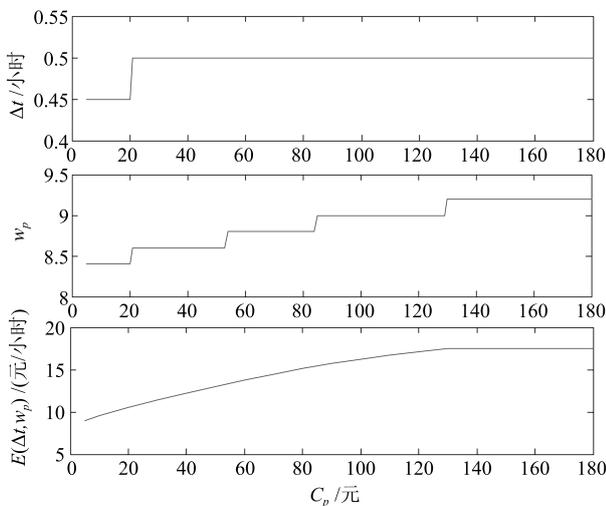


图7 预防性维护费用与最优维护策略及最优长期期望维护费用率的关系

Fig. 7 Relationship between monitoring cost and maintenance policy with the optimal long term expected maintenance cost rate

图8表示预防性替换费用与最优维护策略及最优长期期望维护费用率的关系, 假定预防性替换费用 C_r 满足 $50 \text{ 元} \leq C_r \leq 500 \text{ 元}$, 其他参数固定不变. 从图8可以看出, 对于最优长期期望维护费用率而言, 当预防性替换费用 C_r 从 50 元变化至 500 元, 最优长期期望维护费用率从 8.4 元/小时线性变化至 21.1 元/小时, 意味着预防性替换费用 C_r 每增加 1 元, 最优长期期望维护费用率增加约 0.028 元/小时, 由于最优长期期望维护费用率在整个区间内始终保持这种线性变化关系, 因而最优长期期望维护费用

率受到预防性替换费用的影响最为明显. 对于预防性维护阈值而言, 随着预防性替换费用的变化, 预防性维护阈值分别在 $C_r = 90, 160, 235, 355, 460$ 元附近呈现明显的降低趋势, 每次降低约 0.2 元, 预防性维护阈值在预防性替换费用的大部分区间内均保持恒定, 因而预防性维护阈值受到预防性替换费用的影响较为明显. 对于检测间隔而言, 当预防性替换费用 $50 \text{ 元} \leq C_r \leq 450 \text{ 元}$ 时, 检测间隔始终保持在 0.5 小时附近, 预防性替换费用 C_r 在 450 元附近时, 检测间隔会上升至 0.55 小时. 检测间隔上升的原因是当预防性替换费用在失效性替换费用附近时, 预防性替换已难以降低设备的维护成本, 意味着无需再进行提前更换, 因而检测间隔会有所上升.

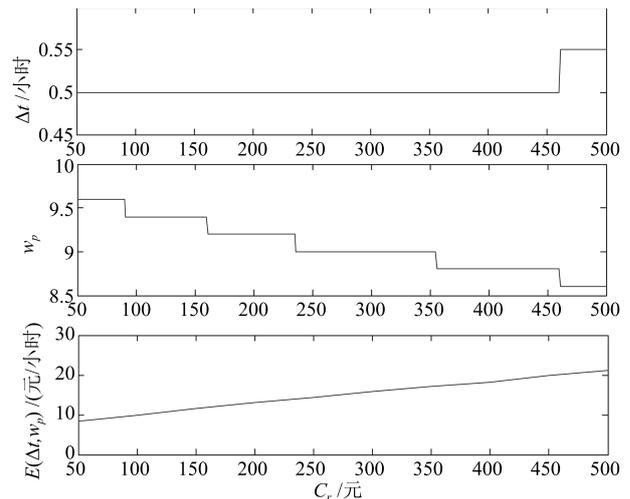


图8 预防性替换费用与最优维护策略及最优长期期望维护费用率的关系

Fig. 8 Relationship between preventive replacement cost and maintenance policy with the optimal long term expected maintenance cost rate

综合上述实验研究可以看出, 1) 在给定的费用参数条件下, 本文模型能够对工程设备的检测间隔 Δt 与预防性维护阈值 w_p 进行联合优化, 保证了设备运行的安全性和可靠性, 延长了设备的服役期限, 降低了设备的维护成本, 进而实现了设备的最优维护. 2) 对于不同的费用参数, 最优维护策略的敏感程度具有明显的差异性. 具体地, 对于检测费用而言, 检测间隔的敏感程度高于预防性维护阈值的敏感程度; 相反, 对于预防性维护费用和预防性替换费用而言, 预防性维护阈值的敏感程度远高于检测间隔的敏感程度. 长期期望维护费用率对于不同费用参数的敏感程度具有一定相似性. 一般来说, 随着费用参数的增长, 长期期望维护费用率将线性递增.

5 结论

本文针对工程关键设备, 基于实际中普遍采用

的定期检测策略,提出一种考虑不完美维护活动影响的性能退化模型和维护决策模型,融合了不完美维护对设备退化量和退化率的双重影响,确定了最优的检测间隔和预防性维护阈值,进而达到了降低设备维护费用的最终目的.由于 Wiener 过程通常仅用来描述线性退化过程,无法准确刻画出非线性退化过程,因而采用本文模型对非线性退化设备进行维护决策时,维护决策的结果会受到严重影响,难以实现工程实际中的最优维护.针对该模型的不足,下一步将研究如何基于非线性扩散过程对不完美维护干预下的非线性退化设备进行剩余寿命预测,以及如何利用剩余寿命预测信息进行维护决策模型的构建.

References

- Pecht M G. *Prognostics and Health Management of Electronics*. New Jersey, USA: John Wiley, 2008.
- Zhou Dong-Hua, Wei Mu-Heng, Si Xiao-Sheng. A survey on anomaly detection, life prediction and maintenance decision for industrial processes. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(6): 711–722
(周东华, 魏慕恒, 司小胜. 工业过程异常检测、寿命预测与维修决策的研究进展. 自动化学报, 2013, **39**(6): 711–722)
- Cheng Zhi-Jun, Guo-Bo. Optimization of inspection and maintenance policy for deteriorating system with semi-Markov decision process. *Acta Automatica Sinica*, 2007, **33**(10): 1101–1104
(程志君, 郭波. 基于半 Markov 决策过程的劣化系统检测与维修优化模型. 自动化学报, 2007, **33**(10): 1101–1104)
- Guo C M, Wang W B, Guo B, Si X S. A maintenance optimization model for mission-oriented systems based on Wiener degradation. *Reliability Engineering and System Safety*, 2013, **111**: 183–194
- Tu Hui-Ling, Zhang Sheng-Gui, Si Shu-Bin, Dui Hong-Yan. The integrated importance measure of multi-state compound systems for maintenance processes. *Acta Automatica Sinica*, 2014, **40**(1): 126–134
(涂慧玲, 张胜贵, 司书宾, 兑红炎. 面向维修过程的多态混联系统综合重要度计算方法. 自动化学报, 2014, **40**(1): 126–134)
- Zhang M M, Gaudoin O, Xie M. Degradation-based maintenance decision using stochastic filtering for systems under imperfect maintenance. *European Journal of Operational Research*, 2015, **245**(2): 531–541
- Zhang M M, Ye Z S, Xie M. A condition-based maintenance strategy for heterogeneous populations. *Computers and Industrial Engineering*, 2014, **77**: 103–114
- Xu Xiao-Bin, Zhang Zhen, Li Shi-Bao, Wen Cheng-Lin. Fault diagnosis based on fusion and updating of diagnosis evidence. *Acta Automatica Sinica*, 2016, **42**(1): 107–121
(徐晓滨, 张镇, 李世宝, 文成林. 基于诊断证据静态融合与动态更新的故障诊断方法. 自动化学报, 2016, **42**(1): 107–121)
- Gao Wen-Ke, Zhang Zhi-Sheng, Zhou Yi-Fan, Liu Yang, Liu Qi. Reliability modeling and maintenance policy for main and supplementary parallel system with failure interaction and imperfect detection. *Acta Automatica Sinica*, 2015, **41**(12): 2100–2114
(高文科, 张志胜, 周一帆, 刘颺, 刘祺. 存在故障相关及不完备检测的主辅并联系统可靠性建模与维修策略. 自动化学报, 2015, **41**(12): 2100–2114)
- Pham H, Wang H Z. Imperfect maintenance. *European Journal of Operational Research*, 1996, **94**(3): 425–438
- Mercier S, Castro I T. On the modelling of imperfect repairs for a continuously monitored gamma wear process through age reduction. *Journal of Applied Probability*, 2013, **50**(4): 1057–1076
- Van P D, Voisin A, Levrat E, Lung B. Remaining useful life based maintenance decision making for deteriorating systems with both perfect and imperfect maintenance actions. In: Proceedings of the 2013 IEEE Conference on Prognostics and Health Management. Gaithersburg, MD, USA: IEEE, 2013. 1–9
- Castro I T. A model of imperfect preventive maintenance with dependent failure modes. *European Journal of Operational Research*, 2009, **196**(1): 217–224
- Wang Z Q, Hu C H, Wang W B, Si X S. A simulation-based remaining useful life prediction method considering the influence of maintenance activities. In: Proceedings of the 2014 Prognostics and System Health Management Conference. Zhangjiajie, China: IEEE, 2014. 284–289
- Khatab A. Hybrid hazard rate model for imperfect preventive maintenance of systems subject to random deterioration. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2015, **26**(3): 601–608
- Kijima M. Some results for repairable systems with general repair. *Journal of Applied Probability*, 1989, **26**(1): 89–102
- Nakagawa T. Sequential imperfect preventive maintenance policies. *IEEE Transactions on Reliability*, 1988, **37**(3): 295–298
- Zhou X J, Xi L F, Lee J. Reliability-centered predictive maintenance scheduling for a continuously monitored system subject to degradation. *Reliability Engineering and System Safety*, 2007, **92**(4): 530–534
- Si X S, Wang W B, Hu C H, Zhou D H. Remaining useful life estimation — a review on the statistical data driven approaches. *European Journal of Operational Research*, 2011, **213**(1): 1–14
- Van P D, Bérenguer C. Condition-based maintenance with imperfect preventive repairs for a deteriorating production system. *Quality and Reliability Engineering International*, 2012, **28**(6): 624–633
- Si Xiao-Sheng, Hu Chang-Hua, Zhou Dong-Hua. Nonlinear degradation process modeling and remaining useful life estimation subject to measurement error. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(5): 530–541
(司小胜, 胡昌华, 周东华. 带测量误差的非线性退化过程建模与剩余寿命估计. 自动化学报, 2013, **39**(5): 530–541)

22 Huang Z Y, Xu Z G, Ke X J, Wang W H, Sun Y X. Remaining useful life prediction for an adaptive skew-Wiener process model. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, **87**: 294–306

23 Ge En-Shun, Li Qing-Min, Zhang Guang-Yu, Yang Mei-Ling. Optimization of condition-based maintenance for degradation systems under imperfect maintenance. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2013, **34**(2): 316–324 (葛恩顺, 李庆民, 张光宇, 杨美玲. 考虑不完全维修的劣化系统最优视情维修策略. *航空学报*, 2013, **34**(2): 316–324)



裴洪 火箭军工程大学控制工程系博士研究生. 主要研究方向为预测与健康

管理, 预测维护和寿命估计.

E-mail: ph2010hph@sina.com

(**PEI Hong** Ph.D. candidate in the Department of Automation Technology, Xi'an Institute of High Technology.

His research interest covers prognostics and health management, predictive maintenance, and lifetime estimation.)

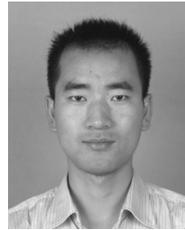


胡昌华 火箭军工程大学控制工程系教授. 主要研究方向为故障诊断, 可靠性工程. 本文通信作者.

E-mail: hch6603@263.net

(**HU Chang-Hua** Professor in the Department of Automation Technology, Xi'an Institute of High Technology.

His research interest covers fault diagnosis and reliability engineering. Corresponding author of this paper.)



司小胜 火箭军工程大学控制工程系博士研究生. 主要研究方向为预测与健康

管理, 剩余寿命估计, 可靠性与预测维

护.
E-mail: sxs09@mails.tsinghua.edu.cn
(**SI Xiao-Sheng** Ph.D. candidate in the Department of Automation Technology, Xi'an Institute of High Technol-

ogy. His research interest covers prognostics and health management, remaining useful life estimation, reliability and predictive maintenance.)



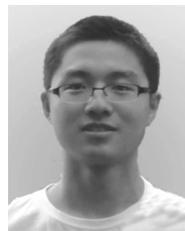
张正新 火箭军工程大学控制工程系博士研究生. 主要研究方向为预测与健康

管理, 预测维护和寿命估计.

E-mail: zhangzhengxin13@gmail.com

(**ZHANG Zheng-Xin** Ph.D. candidate in the Department of Automation Technology, Xi'an Institute of High Technology. His research interest covers

prognostics and health management, predictive maintenance, and lifetime estimation.)



杜党波 火箭军工程大学控制工程系博士研究生. 主要研究方向为预测与健康

管理, 预测维护和寿命估计.

E-mail: ddb_effort@126.com

(**DU Dang-Bo** Ph.D. candidate in the Department of Automation Technology, Xi'an Institute of High Technology. His research interest covers progn-

ostics and health management, predictive maintenance, and lifetime estimation.)