

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2023.229

引用格式:黎新龙,姜帅,陈法法,等.考虑故障差异的等周期预防性维修策略优化[J].重庆大学学报,2026,49(3):49-58.



## 考虑故障差异的等周期预防性维修策略优化

黎新龙<sup>1</sup>,姜帅<sup>1</sup>,陈法法<sup>1</sup>,陈保家<sup>1</sup>,张根保<sup>2,3</sup>

(1. 三峡大学水电机械设备设计与维护湖北省重点实验室,湖北宜昌 443002; 2. 重庆大学机械传动国家重点实验室,重庆 400044; 3. 重庆文理学院智能制造工程学院,重庆 402160)

**摘要:**等周期预防性维修策略是一种常见且实施简单的维修策略。针对等周期预防性维修策略优化建模粒度过大,且鲜有考虑故障差异(预防性维修对不同故障维修效果存在差异性)等问题,文章以元动作单元为研究对象,将其故障分为损伤故障和本质疲劳故障,考虑预防性维修对这2类故障维修效果存在的差异性,以混合故障率模型描述不完全预防性维修效果,建立了元动作单元的等周期不完全预防性维修策略优化模型,并给出了模型的优化求解算法。最后,通过数值分析对模型的有效性进行了验证,分析不同维修成本对最优维修成本率以及最优维修策略的影响。研究结果表明:不考虑预防性维修效果差异性会低估元动作单元的维修成本率;不同类型维修成本和故障类型的占比对元动作单元最优维修策略的制定有显著的影响。

**关键词:**预防性维修;元动作单元;不完全维修;混合故障率模型;维修效果

中图分类号:TH17

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2026)03-049-10

## Optimization of an equal-cycle preventive maintenance strategy considering fault differences

LI Xinlong<sup>1</sup>, JIANG Shuai<sup>1</sup>, CHEN Fafa<sup>1</sup>, CHEN Baojia<sup>1</sup>, ZHANG Genbao<sup>2,3</sup>

(1. Hubei Key Laboratory of Hydroelectric Machinery Design and Maintenance, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, P. R. China; 2. State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China; 3. College of Mechanical Engineering, Chongqing University of Arts and Sciences, Chongqing 402160, P. R. China)

**Abstract:** The equal-cycle preventive maintenance strategy is widely used due to its simplicity and ease of implementation. However, existing optimization models typically adopt a coarse modeling granularity and rarely account for fault differences, particularly the varying effects of preventive maintenance on different failure types. To address these limitations, this study takes the meta-action unit as the basic research object and classifies unit failures into damage failures and intrinsic fatigue failures, while explicitly considering the differing impacts of preventive maintenance on these two failure types. A hybrid failure-rate model is used to characterize imperfect

收稿日期:2023-07-01 网络出版日期:2024-01-22

基金项目:三峡大学人才科研启动基金(2023RCKJ008);国家自然科学基金资助项目(51835001)。

Supported by China Three Gorges University Talent Research Launch Fund (2023RCKJ008), and National Natural Science Foundation of China (551835001).

作者简介:黎新龙(1993—),男,博士,主要从事维修决策与优化研究,(E-mail)xinlongl@163.com。

通信作者:陈法法,男,教授,(E-mail)chenfafa2005@126.com。

maintenance effects, and an optimization model for an equal-cycle imperfect preventive maintenance strategy is developed. Numerical analyses are performed to verify the effectiveness of the proposed model and to investigate the influence of different maintenance cost structures on the optimal maintenance cost rate and maintenance strategy. The results indicate that neglecting differences in preventive maintenance effects leads to an underestimation of the maintenance cost rate of the meta-action unit, and that both maintenance cost types and the proportion of failure modes have a significant impact on the determination of the optimal maintenance strategy.

**Keywords:** preventive maintenance; meta-action unit; imperfect maintenance; hybrid failure rate; maintenance effect

预防性维修是降低设备故障发生概率、延长设备使用寿命的手段,应用非常广泛。预防性维修主要分为2种:基于时间的预防性维修<sup>[1-2]</sup>和基于状态的预防性维修<sup>[3-4]</sup>。随着传感与监测技术的发展,基于状态的预防性维修应用越来越广泛,但因其维修成本高昂、技术要求高,很多设备依然采用基于时间的预防性维修策略<sup>[5]</sup>。基于时间的预防性维修可进一步分为等周期预防性维修和顺序预防性维修<sup>[6]</sup>,等周期预防性维修具有操作简单、便于维修管理的特点,在实际工程中的应用相较于顺序预防性维修更加广泛<sup>[7]</sup>。不少学者对等周期预防性维修策略进行了研究:黄傲林等<sup>[8]</sup>以长期维修成本率为目标函数,基于PAS模型建立了劣化系统的等周期不完全预防性维修优化模型,并给出了模型的优化求解算法;Lee等<sup>[9]</sup>基于广义Polya过程提出了一种二元预防性更换策略,并研究了最优策略的性质;Wang等<sup>[10]</sup>采用广义几何过程描述可修系统的退化,分别研究了系统的等周期和顺序预防性维修策略。

尽管现有等周期预防性维修策略的研究取得了不错的成效,但依然存在一些问题。首先,鲜有研究考虑预防性维修对不同故障维修的差异化效果,通常假设预防性维修对设备所有故障都起作用并不合理。实际上预防性维修通常都是一些常规操作,比如清洗、润滑等,它能有效预防损伤故障(磨损等)的发生,但对本质疲劳故障(疲劳断裂等)却起不到很好的效果<sup>[11]</sup>。其次,目前维修决策和建模的粒度通常是整个系统或者部件,包含的零件数目多、结构复杂,易导致过维修,而且还不便于故障的定位。元动作理论<sup>[12-13]</sup>最早由重庆大学张根保教授提出,主要用于机电产品可靠性分析、建模和精细化控制;近些年来,元动作方法备受关注,应用越来越广泛<sup>[14-17]</sup>。元动作单元是元动作的结构化实体,其粒度介于部件和零件之间,比部件包含的零件数目少,结构更加细化,在一定程度上能够避免过维修;比零件的粒度大,更便于实现维修策略的整合。以元动作单元为决策对象而制定的维修策略更加精准,在一定程度上能够避免过维修,充分利用单元的寿命。

基于上述原因,文中以元动作单元为研究对象,以混合故障率模型描述预防性维修的效果,考虑预防性维修对单元不同类型故障维修效果的差异性,建立了其等周期不完全预防性维修策略优化模型,分析了不同维修成本以及损伤故障比例因子对最优维修成本率和维修策略的影响。

## 1 模型假设

1)初始时刻元动作单元的故障率为零。

2)元动作单元中存在2种类型的故障,第一种是损伤故障,第二种是本质疲劳故障。预防性维修对损伤故障起作用,但对本质疲劳故障不起作用。

3)对元动作单元实施等周期预防性维修策略,即 $(N, T)$ 策略。元动作单元前 $N-1$ 次预防性维修为不完全维修;第 $N$ 次预防性维修对元动作单元进行更换,使其修复如新;2次预防性维修之间发生的故障进行修复性维修,修复性维修为最小维修,使其恢复到故障之前的状态;元动作单元的预防性维修周期为 $T$ 。

4)单次修复损伤故障的成本为 $c_m^h$ ,单次修复本质疲劳故障的成本为 $c_m^u$ ,单次进行不完全预防性维修的成

本为  $c_p$ , 单次更换成本为  $c_r$ 。

5) 各种类型的维修时间相对元动作单元的寿命而言很短, 可忽略不计。

## 2 元动作单元的故障率

元动作单元总的故障率  $\lambda(t)$  由 2 部分组成, 为

$$\lambda(t) = h(t) + \mu(t), \tag{1}$$

式中:  $h(t)$  为损伤故障的故障率函数;  $\mu(t)$  表示本质疲劳故障的故障率函数。

机电产品的故障率一般可用威布尔分布描述, 则元动作单元总的故障率函数  $\lambda(t)$  为

$$\lambda(t) = \alpha\beta t^{\beta-1}, \tag{2}$$

式中,  $\alpha$  和  $\beta$  分别为形状参数和尺度参数。损伤故障的初始故障率函数  $h(t)$  和本质疲劳故障的初始故障率函数  $\mu(t)$  可表示为

$$\begin{cases} h(t) = e\alpha\beta t^{\beta-1} \\ \mu(t) = f\alpha\beta t^{\beta-1} \end{cases}, \alpha > 0, \beta > 1, \tag{3}$$

式中,  $e$  和  $f$  分别表示元动作单元损伤故障和本质疲劳故障的比例因子,  $e+f=1$ 。

## 3 不完全维修效果模型

基于时间的不完全维修效果模型主要有 3 种<sup>[18]</sup>: 故障率调整模型、役龄回退模型和混合故障率模型。对损伤故障, 预防性维修后其故障率得到改善, 3 种不完全维修效果模型对比如图 1 所示。

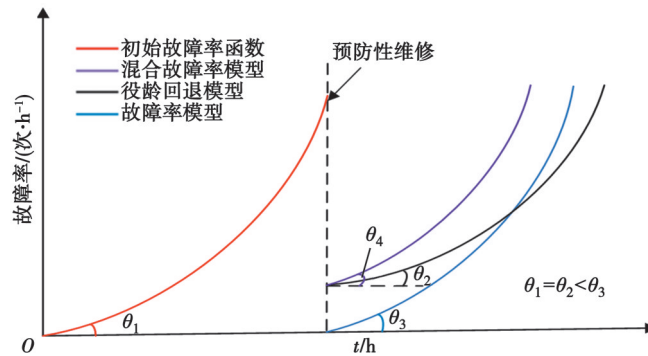


图 1 可修故障的 3 种不完全维修效果模型对比

Fig. 1 Comparison of three imperfect maintenance effect models for repairable faults

混合故障率模型同时考虑了预防性维修对有效役龄和故障率的影响, 综合了役龄回退模型和故障率调整模型的优点, 能更好地解释元动作单元预防性维修的修后效果<sup>[19]</sup>。因此, 文中建立元动作单元的不完全预防性维修策略优化模型时, 采用混合故障率模型来描述预防性维修的效果。假设,  $(0, t_1)$  为元动作单元首次预防性维修阶段, 其故障率函数为  $h_1(t)$ 。在  $t_1$  时刻对元动作单元进行预防性维修, 在  $(t_1, t_2)$  的故障率函数为  $h_2(t)$ , 则  $h_1(t)$  和  $h_2(t)$  的关系为

$$h_2(t_1 + x) = a_1 h_1(b_1 t_1 + x), \tag{4}$$

式中:  $x \in (t_2 - t_1)$ ;  $a_1$  表示第一次预防性维修的故障率调整因子;  $b_1$  表示第一次预防性维修的役龄调整因子。以此类推, 可得元动作单元第  $j-1$  次预防性维修前后的故障率函数  $h_{j-1}(t)$  和  $h_j(t)$  的关系为

$$h_j(t_{j-1} + x) = a_{j-1} h_{j-1}(b_{j-1} B_{j-1} + x), \tag{5}$$

$$B_{j-1} = b_{j-2} \cdot x_{j-2} + b_{j-2} b_{j-3} \cdot x_{j-3} + \dots + b_{j-2} b_{j-3} \dots + b_1 \cdot x_1, \tag{6}$$

式中:  $x \in (t_{j-1}, \infty)$ ,  $t_{j-1}$  表示第  $j-1$  次预防性维修的日历时间;  $B_{j-1}$  表示第  $j-1$  次维修前的有效役龄,  $x_i (i=1, 2, \dots)$

表示第*i*个维修周期的长度; $a_{j-1}$ 表示第*j*-1次预防性维修的故障率调整因子; $b_{j-1}$ 表示第*j*-1次预防性维修的役龄调整因子。对任意的 $a_k$ 和 $b_k$ ,当 $k=0$ 时, $a_k=1, b_k=0$ ;当 $k$ 为正整数时, $1 \leq a_1 \leq a_2 \leq \dots \leq a_k, 0 \leq b_1 \leq b_2 \leq \dots \leq b_k < 1$ 。如果对任意 $a_k$ 和 $b_k, a_k=1$ ,则混合故障率模型变为役龄回退模型; $b_k$ 恒等于零时,模型变为故障率模型。

用 $h_j(t)$ 表示第*j*-1次预防性维修后的故障率函数,则在第*j*个预防性维修周期内期望的修复性维修次数可以表示为

$$H_j(x) = \int_0^{T_j} h_j(t) dt. \quad (7)$$

考虑到元动作单元中存在损伤故障和本质疲劳故障,设 $e:f=9:1, \alpha=3e-6, \beta=2.5$ ,预防维修周期为300 h,预防性维修次数 $N=3$ 时,一个更新周期内元动作单元故障率的变化情况如图2所示。

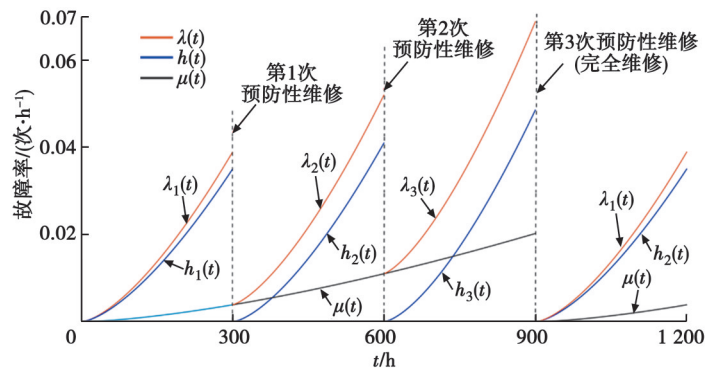


图2 一个更新周期内元动作单元故障率的变化情况

Fig. 2 Variation of the failure rate of the meta-action unit in an update cycle

#### 4 等周期预防性维修建模

笔者为元动作单元制定 $(N, T)$ 维修策略,即元动作单元经历 $N-1$ 次维修周期为 $T$ 的不完全预防性维修,对元动作单元进行第 $N$ 次预防性维修( $NT$ 时刻)时,对其进行更换,使其修复如新。

元动作单元在一个更新周期上发生损伤故障和本质疲劳故障的期望个数分别用 $N_h$ 和 $N_\mu$ 表示,表达式为

$$N_h = \int_0^T h_1(t) dt + \int_0^T h_2(t) dt + \dots + \int_0^T h_N(t) dt = e \left\{ \left( \prod_0^{j-1} a_j \right) \cdot \alpha \left[ (b_{j-1}T + b_{j-1}b_{j-2}T + \dots + b_{j-1}b_{j-2} \dots \cdot b_0T + T)^\beta - (b_{j-1}T + b_{j-1}b_{j-2}T + \dots + b_{j-1} \dots \cdot b_0T)^\beta \right] \right\} = \quad (8)$$

$$e \alpha T^\beta \left\{ \left( \prod_0^{j-1} a_j \right) \cdot \left[ (b_{j-1} + b_{j-1}b_{j-2} + \dots + b_{j-1}b_{j-2} \dots \cdot b_0 + 1)^\beta - (b_{j-1} + b_{j-1}b_{j-2} + \dots + b_{j-1} \dots \cdot b_0)^\beta \right] \right\},$$

$$N_\mu = \int_0^{NT} \mu(t) dt = \int_0^{NT} f \alpha \beta t^{\beta-1} dt = f \alpha (N \cdot T)^\beta, \quad (9)$$

式中:当 $j-1 < 0$ 时, $b_{j-1}=0$ 。元动作单元运行的平均维修成本率 $C(N, T)$ 为

$$C(N, T) = \frac{c_r + c_m^h N_h + c_m^\mu N_\mu + (N-1)c_p}{NT}. \quad (10)$$

通过优化求解,使得 $C(N, T)$ 取最小值,可以得到最优维修策略 $(N^*, T^*)$ 。

##### 4.1 预防性维修周期 $T^*$ 的确定

为表达方便,对式(8)进行简化,可得 $N_h$ 为

$$N_h = e \alpha T^\beta S(N), \quad (11)$$

$$S(N) = \left\{ \left( \prod_0^{j-1} a_j \right) \cdot \left[ (b_{j-1} + b_{j-1}b_{j-2} + \dots + b_{j-1}b_{j-2} \dots \cdot b_0 + 1)^\beta - (b_{j-1} + b_{j-1}b_{j-2} + \dots + b_{j-1} \dots \cdot b_0)^\beta \right] \right\}. \quad (12)$$

当预防性维修次数  $N$  确定时,维修成本率  $C(N, T)$  是关于  $T$  的一元函数,用式 (10) 对  $T$  求偏导,可得

$$\frac{\partial C(N, T)}{\partial T} = \frac{c_m^h e a \beta T^{\beta-1} S(N) + c_m^u f a \beta N^\beta T^{\beta-1}}{NT} - \frac{c_r + c_m^h e a T^\beta S(N) + c_m^u f a N^\beta T^\beta + (N-1)c_p}{NT^2}, \quad (13)$$

令  $\frac{\partial C(N, T)}{\partial T} = 0$ , 可求得  $T^*$

$$T^* = \left( \frac{c_r + (N-1)c_p}{(\beta-1)[e a c_m^h S(N) + c_m^u f a N^\beta]} \right)^{(1/\beta)}. \quad (14)$$

### 4.2 模型求解算法

建立的模型如式 (15) 所示,其目标是使元动作单元长期运行的维修成本率最小。

$$\begin{cases} \min(C(N, T)), \\ \text{s.t.} \begin{cases} T > 0, \\ N \in N^+ \ \& \ N \leq N_{\max}, \end{cases} \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $N^+$  表示正整数;  $N_{\max}$  表示最多容许的预防性维修次数,通常由专家根据经验确定。

根据式 (15) 所示的优化模型和对预防性维修周期  $T^*$  的推导,文中给出的求解算法如图 3 所示。通过图 3 中给出的最优维修策略求解算法流程,可以求得元动作单元最优维修成本率  $C(N^*, T^*)$  及其对应的最优维修策略  $(N^*, T^*)$ 。

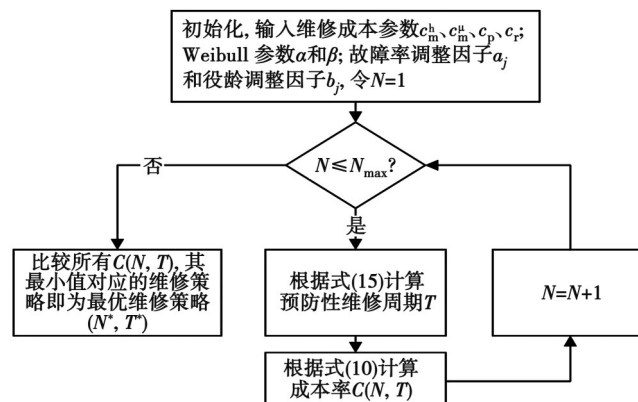


图 3 求解算法流程图

Fig. 3 Flowchart of solving algorithm

## 5 算例分析

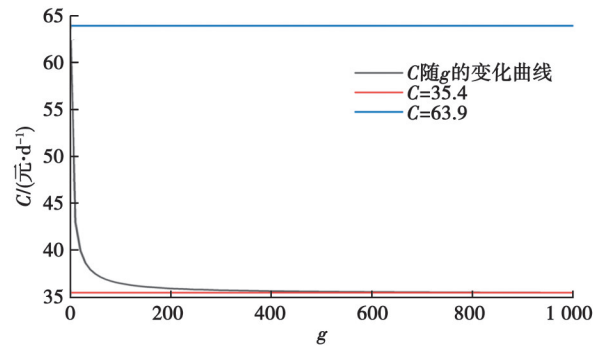
某元动作单元各维修成本参数和威布尔分布参数  $\alpha$  和  $\beta$  取值如下:  $c_r=10\ 000$  元,  $c_p=500$  元,  $c_m^h=1\ 000$  元,  $c_m^u=1\ 500$  元,  $\alpha=2.58 \times 10^{-7}$ ,  $\beta=3$ ,  $N_{\max}=100$  次, 参考文献 [20], 故障率调整因子  $a_j$  和役龄调整因子  $b_j$  的取值分别为

$$a_j = \frac{6j+1}{5j+1}, \quad (16)$$

$$b_j = \frac{j}{2j+1}, \quad (17)$$

式中:  $j=0, 1, 2, \dots$ 。故障率调整因子随着维修次数的增加而增加, 役龄调整因子随着维修次数的增加而减少, 意味着预防性维修效果随其维修次数的增加而逐渐减弱。

为探究元动作单元损伤故障/本质疲劳故障的比例对维修成本率  $C$  的影响, 令  $e/f=g$ ,  $C$  随  $g$  的变化如图 4 所示。

图4 维修成本率随 $g$ 的变化Fig. 4 Maintenance cost rate changes with  $g$ 

在图4中, $C$ 随着 $g$ 的增大而减小,这是因为随着 $g$ 值的增加,预防性维修对元动作单元的大部分故障都有作用; $C=35.4$ 表示 $g=+\infty$ 时的维修成本率,这时元动作单元的维修成本率最低; $C=63.9$ 表示 $g=0$ 时的维修成本率,这时元动作单元的维修成本率最高。因此,如果不考虑元动作单元 $g$ 值的差异,令 $g=0$ 或者 $g=+\infty$ ,这会低估或者高估元动作单元的维修成本率,得不到最优维修策略。

Sun等<sup>[11]</sup>指出损伤故障和本质疲劳故障的比例约为9:1。为探究维修成本等参数对元动作单元最优维修成本率和最优维修策略的影响,令元动作单元损伤故障比例因子 $e=0.9$ ,本质疲劳故障比例因子 $f=0.1$ 。

根据上述参数设置,求得元动作单元的最小维修成本率 $C^*=43.5$ 元/d,最优维修策略 $(N^*, T^*)=(5, 82.7)$ ,维修成本率随预防性维修次数变化的曲线如图5所示。从图5中可以看出, $C$ 随 $N$ 的增加而先减小后增大,当 $N=5$ 时, $C$ 取最小值。如果元动作单元采用更换策略,其维修周期为264.3 d,维修成本率为56.8元/d,相比文中给出的维修策略,更换策略的维修成本率要高出30.5%。若不考虑预防性维修对元动作单元损伤故障和本质疲劳故障维修效果的差异性,即令 $e=1, f=0$ ,其他参数不变,求得元动作单元最优维修成本率 $C^*=35.4$ 元/d,最优维修策略 $(N^*, T^*)=(8, 71.6)$ ,相比文中给出的维修策略,维修成本率要低估18.6%。

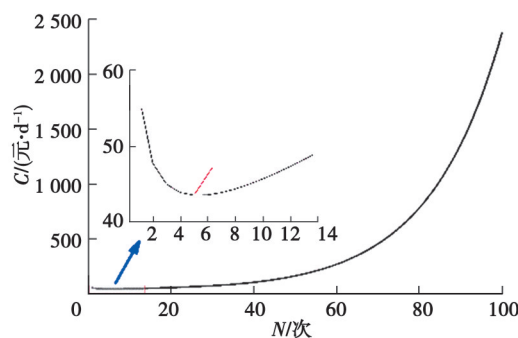


图5 维修成本率随预防性维修次数的变化

Fig. 5 Maintenance cost rate changes with the number of preventive maintenance

不同维修成本的变化对元动作单元的维修策略有重要影响,分别探究损伤故障维修成本 $c_m^h$ 、本质疲劳故障维修成本 $c_m^f$ 、预防性维修成本 $c_p$ 和更换成本 $c_r$ 的变化对元动作单元最优维修成本率,以及最优维修策略的影响。

图6表示损伤故障维修成本 $c_m^h$ 对最优维修成本率以及最优维修策略的影响,其变化范围为 $c_m^h \leq c_r$ ,其他参数保持不变。从图6中可以看出:随着 $c_m^h$ 的增加, $c_r$ 相对减小,可以通过适当增加 $N^*$ 而减小损伤故障发生的概率。因此, $N^*$ 随着 $c_m^h$ 的增加而呈现增加的趋势; $T^*$ 随着 $c_m^h$ 的增加而减小,通过缩短 $T^*$ 减少元动作单元在更新周期上发生故障的期望次数而降低维修成本率; $C^*$ 随着 $c_m^h$ 的增加而增加。

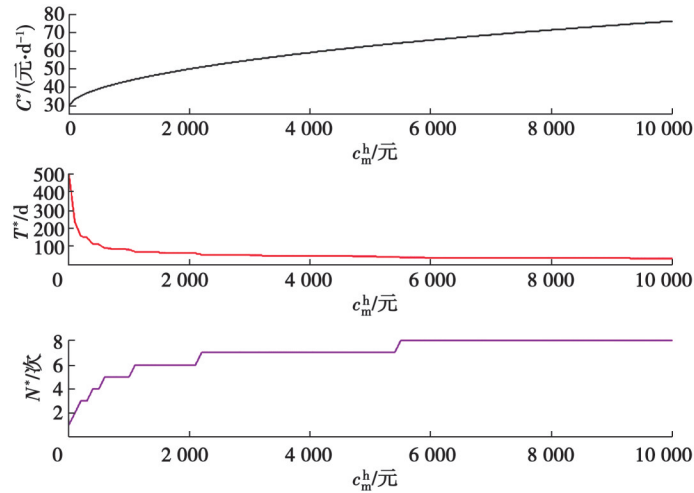


图 6 损伤故障维修成本  $c_m^h$  的变化对最优维修成本率和最优维修策略的影响

Fig. 6 Influence of damage failure maintenance cost  $c_m^h$  changes on optimal maintenance cost rate and optimal maintenance strategy

图 7 为本质疲劳故障维修成本  $c_m^a$  的变化对最优维修成本率和最优维修策略的影响,其变化范围为  $c_m^a \leq c_r$ ,其他参数保持不变。从图 7 中可以看出:1)  $N^*$  随着  $c_m^a$  的增加而呈现减小的趋势。随着  $c_m^a$  的增加,预防性维修所带来的效益相对减弱(预防性维修对本质疲劳故障不起作用),因此适当减少预防性维修。2)  $T^*$  随着  $c_m^a$  的增加而呈现增加的趋势,通过增加  $T^*$  适当延长元动作单元更新周期的长度而降低维修成本率。3)  $C^*$  随着  $c_m^a$  的增加而增加。

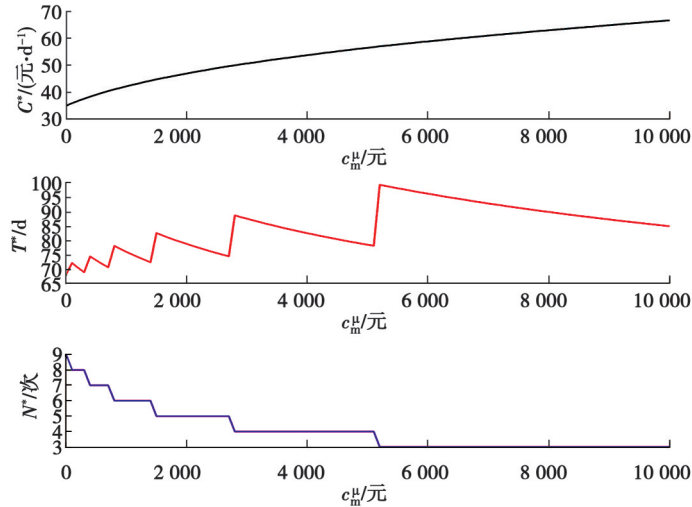


图 7 本质疲劳故障维修成本  $c_m^a$  的变化对最优维修成本率和最优维修策略的影响

Fig. 7 Influence of intrinsic fatigue failure maintenance cost  $c_m^a$  changes on optimal maintenance cost rate and optimal maintenance strategy

图 8 表示预防性维修成本  $c_p$  的变化对最优维修成本率和最优维修策略的影响,其变化范围为  $c_p \leq c_r$ ,其他参数保持不变。从图 8 中可以看出:1) 随着  $c_p$  的增加,  $N^*$  逐渐减小,直至  $N^*=1$ (采取更换策略)而保持不变。2) 随着  $c_p$  的增加,  $T^*$  呈现逐渐增大的趋势以尽量延长更新周期而降低维修成本率,直至  $N^*=1$ (采取更换策略),  $T^*$  取最大值而保持不变。3)  $C^*$  随着  $c_p$  的增加而增加,直至采取更换策略时,  $C^*$  取最大值而保持不变。

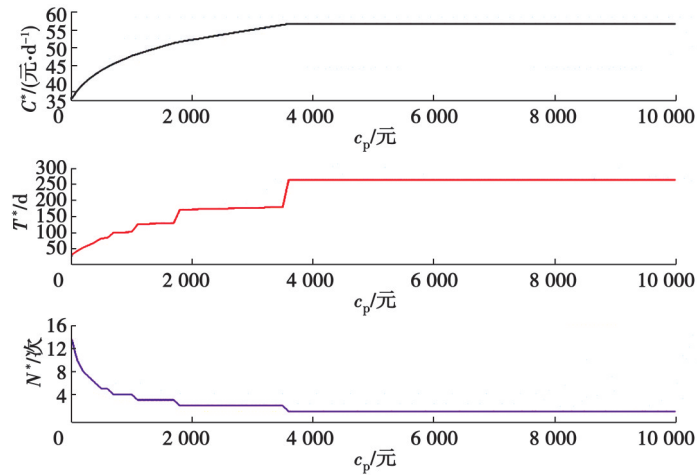


图8 预防性维修成本  $c_p$  的变化对最优维修成本率和最优维修策略的影响

Fig. 8 Influence of preventive maintenance cost  $c_p$  changes on optimal maintenance cost rate and optimal maintenance strategy

图9为更换成本  $c_r$  的变化对最优维修成本率和最优维修策略的影响,其变化范围为  $c_m^u \leq c_r$ ,其他参数保持不变。从图9中可以看出:1)随着  $c_r$  的增加,  $N^*$  逐渐增大。这是因为随着  $c_r$  的增大,  $c_p$  相对减少,通过增加  $N^*$  而减少更新周期上损伤故障发生的次数以降低维修成本率。2)  $T^*$  随着  $c_r$  的增加而减小。这是因为随着  $c_r$  的增大,  $c_p$  相对减少,通过缩短  $T^*$  尽量减少故障发生次数以降低维修成本率。3)  $C^*$  随着  $c_r$  的增加而增加。

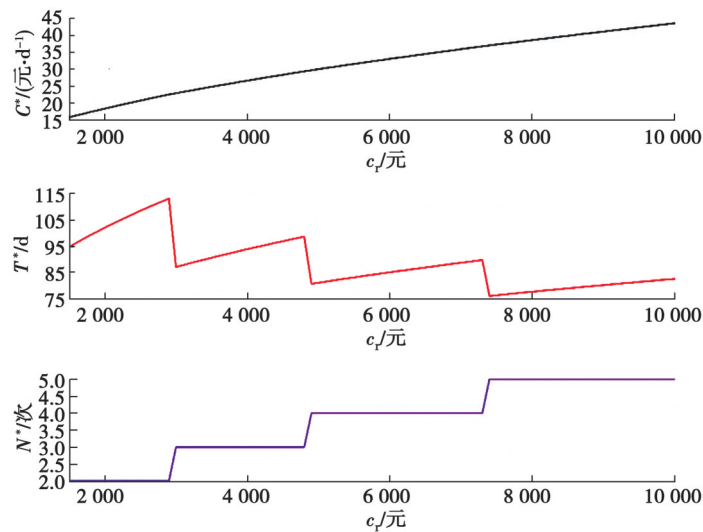


图9 更换成本  $c_r$  的变化对最优维修成本率和最优维修策略的影响

Fig. 9 Influence of replacement cost  $c_r$  changes on optimal maintenance cost rate and optimal maintenance strategy

损伤故障比例因子  $e$  的大小代表着预防性维修对元动作单元故障作用的强弱,其对元动作单元的维修策略有着重要的影响。在相关成本参数、威布尔分布参数不变的情况下,  $e$  的变化对元动作单元最优维修策略和最优维修成本率的影响如图10所示。

图10表示损伤故障比例因子  $e$  的变化对元动作单元最优维修策略和最优维修成本率的影响,其变化范围为  $0 \leq e \leq 1$ ,其他参数保持不变。从图10中可以看出:1)  $e$  越大,元动作单元损伤故障占比越多,预防性维修效果越好。因此,随着  $e$  的增加,  $N^*$  逐渐增大。2) 总体上讲,  $T^*$  随着  $e$  的增加而减小。随着  $e$  的增加,损伤故障占比增加,通过缩短  $T^*$  尽量减少损伤故障发生的次数,从而降低维修成本率。3)  $C^*$  随着  $e$  的增加而减小,这是因为随  $e$  的增加,预防性维修发挥的作用越来越大,更新周期上元动作单元发生的故障数减少,从而降低了维修成本率。

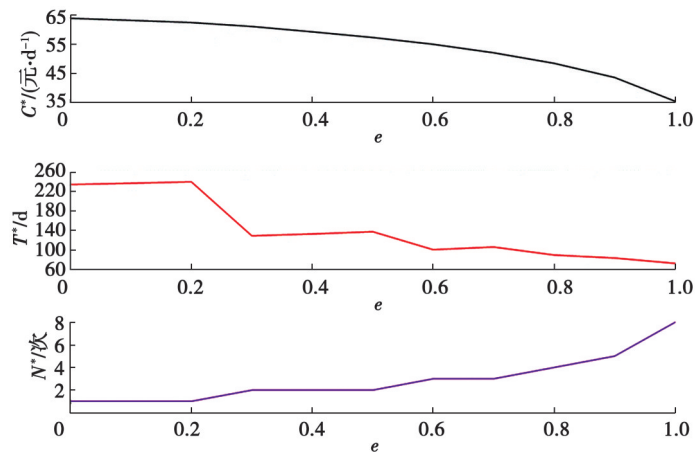


图10 损伤故障比例因子 $e$ 的变化对元动作单元最优维修策略和最优维修成本率的影响

Fig. 10 Influence of damage failure ratio factor  $e$  changes on optimal maintenance cost rate and optimal maintenance strategy

## 6 结 论

文中考虑预防性维修对元动作单元损伤故障和本质疲劳故障维修效果的差异性,基于混合故障率模型建立了元动作单元的等周期不完全预防性维修策略优化模型,将文中方法得到的维修策略、更换策略与不考虑预防性维修效果差异性的等周期预防性维修策略进行了对比,分析了不同类型维修成本与损伤故障比例因子对元动作单元维修成本率及策略的影响,研究结果表明:

1)采用更换策略会增加元动作单元的维修成本率,在给定的条件下,其维修成本率比文中维修策略高出30.5%。

2)不考虑预防性维修对损伤故障和本质疲劳故障维修的差异性效果,会低估元动作单元的维修成本率,得到不合理的维修策略。

3)损伤故障维修成本、本质疲劳故障维修成本、预防性维修成本和更换成本的增加都会导致元动作单元维修成本率的增加,损伤故障比例因子的增加会减少元动作单元的维修成本率;损伤故障维修成本、更换成本和损伤故障比例因子的增加都会导致预防性维修次数增加、周期缩短;本质疲劳故障维修成本和预防性维修成本的增加都会导致预防性维修次数减少、周期延长。

## 参考文献

- [ 1 ] 李晶,王红,何勇,等.考虑动态折旧成本的动车组部件预防性维修决策模型[J].中国机械工程,2023,34(4):498-503.  
Li J, Wang H, He Y, et al. Preventive maintenance decision model for EMU components considering dynamic depreciation costs[J]. China Mechanical Engineering, 2023, 34(4): 498-503. (in Chinese)
- [ 2 ] 王瑞琦,陈光宇,梁娜,等.全寿命周期下退化的大规模系统预防性维修策略优化[J].控制与决策,2022,37(9):2360-2368.  
Wang R Q, Chen G Y, Liang N, et al. Preventive maintenance optimization for deteriorating large-scale systems in life-cycle perspective[J]. Control and Decision, 2022, 37(9): 2360-2368. (in Chinese)
- [ 3 ] 任丽娜,陈锦涛,李建华.基于实时退化量的数控机床状态维修检测间隔期决策研究[J].振动与冲击,2023,42(4):81-87,125.  
Ren L N, Chen J T, Li J H. A study on the inspection interval decision of CNC machine tools condition-based maintenance based on real-time degradation[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(4): 81-87, 125. (in Chinese)
- [ 4 ] 何勇,王红,李晶,等.基于振动监测的部件状态维修与备件订购联合决策[J].航空学报,2022,43(5):349-359.  
He Y, Wang H, Li J, et al. Joint decision making for condition-based maintenance and spare parts ordering of components based on vibration monitoring[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(5): 349-359. (in Chinese)
- [ 5 ] Niu C Y, Jiang J, Ge B F, et al. Preventive maintenance model based on the renewal-geometric process[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability, 2022, 236(2): 348-356.

- [ 6 ] 吴耀胜, 刘勤明, 叶春明. 基于混合故障率的设备分阶段顺序维修决策优化研究[J]. 工业工程, 2022, 25(3): 151-156.  
Wu Y S, Liu Q M, Ye C M. Maintenance decision optimization based on a phased sequential mixing device failure rate[J]. Industrial Engineering Journal, 2022, 25(3): 151-156. (in Chinese)
- [ 7 ] 席启超, 曹继平, 陈桂明, 等. 一种基于可靠度约束的分阶段等周期预防性维修模型研究[J]. 兵工学报, 2017, 38(11): 2251-2258.  
Xi Q C, Cao J P, Chen G M, et al. Research on a phased periodic preventive maintenance model based on reliability constraint [J]. Acta Armamentarii, 2017, 38(11): 2251-2258. (in Chinese)
- [ 8 ] 黄傲林, 李庆民, 黎铁冰, 等. 劣化系统周期预防性维修策略的优化[J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(6): 1103-1107.  
Huang A L, Li Q M, Li T B, et al. Optimization of periodic preventive maintenance policies for deteriorating repairable system [J]. Systems Engineering and Electronics, 2014, 36(6): 1103-1107. (in Chinese)
- [ 9 ] Lee H, Cha J H. A bivariate optimal replacement policy for a system subject to a generalized failure and repair process[J]. Applied Stochastic Models in Business and Industry, 2019, 35(3): 637-650.
- [ 10 ] Wang G J, Yam R C M. Generalized geometric process and its application in maintenance problems[J]. Applied Mathematical Modelling, 2017, 49: 554-567.
- [ 11 ] Sun Q Z, Ye Z S, Peng W W. Scheduling preventive maintenance considering the saturation effect[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2019, 68(2): 741-752.
- [ 12 ] Ran Y, Zhang G B, Zhang L. Quality characteristic association analysis of computer numerical control machine tool based on meta-action assembly unit[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2016, 8: 1687814016629344.
- [ 13 ] Yu H, Zhang G B, Ran Y. A more reasonable definition of failure mode for mechanical systems using meta-action[J]. IEEE Access, 2019, 7: 4898-4904.
- [ 14 ] 陈一凡, 张根保, 冉琰, 等. 面向元动作的机械传动系统可靠性分配方法[J]. 中国机械工程, 2021, 32(17): 2032-2039.  
Chen Y F, Zhang G B, Ran Y, et al. Meta-action-oriented reliability allocation method of mechanical transmission systems[J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(17): 2032-2039. (in Chinese)
- [ 15 ] Li J F, Li Y L, Wen S T, et al. A novel method of key meta-action unit integrated identification for CNC machine tool reliability [J]. Computers & Industrial Engineering, 2023, 177: 109073.
- [ 16 ] Wang Z C, Ran Y, Yang X, et al. Primary failure mode and effects analysis with function-motion-action hierarchy structure for mechatronic systems[J]. Engineering Failure Analysis, 2021, 130: 105775.
- [ 17 ] 李宇龙, 张根保, 王勇勤, 等. 数控机床基于元动作的FMEA分析技术研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2019, 46(10): 64-75.  
Li Y L, Zhang G B, Wang Y Q, et al. Research on FMEA analysis technology based on meta-action for numerical control machine tool[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2019, 46(10): 64-75. (in Chinese)
- [ 18 ] 刘洋. 面向复杂机电产品的多目标维修优化及其应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.  
Liu Y. Multi-objective maintenance optimization and its application for complex electromechanical products[D]. Nanjing: Southeast University, 2019. (in Chinese)
- [ 19 ] Li X L, Ran Y, Zhang G B. Optimization of equal-cycle maintenance strategy considering imperfect preventive maintenance[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, 2022, 236(4): 1392-1402.
- [ 20 ] Lin D M, Zuo M J, Yam R C M. General sequential imperfect preventive maintenance models[J]. International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering, 2000, 7(3): 253-266.

(编辑 詹燕平)