

文章编号:1006-2467(2023)11-1522-09

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2022.023

# 考虑维修效果差异性的顺序预防性维修策略

黎新龙<sup>1</sup>, 冉 琰<sup>1</sup>, 张根保<sup>1,2,3</sup>, 何 彦<sup>1,2</sup>

(1. 重庆大学 机械与运载工程学院, 重庆 400044; 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:** 合适的预防性维修在一定程度上能提高设备可靠性, 延长设备寿命. 针对目前预防性维修策略决策粒度过大且鲜有考虑预防性维修对不同类故障维修效果的差异性问题, 研究了元动作单元的不完全顺序预防性维修策略. 以元动作单元为研究载体, 将故障分为损伤类故障和本质疲劳类故障, 基于广义几何过程(GGP)建立了考虑维修效果差异性的顺序预防性维修优化模型, 分析了维修成本等因数对最优维修成本率以及最优维修策略的影响. 研究表明: 不考虑预防性维修效果的差异性会低估总体的维修成本率. 同时, 各类型维修成本、故障比例因子以及预防性维修效果参数都对维修策略的制定有显著影响. 该研究对制定元动作单元顺序预防性维修策略, 减少其维修成本具有一定的指导作用.

**关键词:** 预防性维修; 元动作单元; 广义几何过程; 顺序维修; 不完美维修

**中图分类号:** TH 17 **文献标志码:** A

## Sequential Preventive Maintenance Strategy Considering Difference of Maintenance Effect

LI Xinlong<sup>1</sup>, RAN Yan<sup>1</sup>, ZHANG Genbao<sup>1,2,3</sup>, HE Yan<sup>1,2</sup>

(1. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;  
2. State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, China;  
3. School of Intelligent Manufacturing Engineering, Chongqing University of Arts and Sciences, Chongqing 402160, China)

**Abstract:** Proper preventive maintenance can improve equipment reliability and prolong equipment life to a certain extent. Aimed at the problems that the decision granularity of the current preventive maintenance strategy is too large and the maintenance effect of preventive maintenance on different types of failures is rarely considered, the imperfect sequential preventive maintenance strategy of the meta-action unit is studied. Taking the meta-action unit as the research carrier, the failures are divided into damage failure and essential fatigue failure according to the difference of preventive maintenance effect. Based on the generalized geometric process, a sequential preventive maintenance optimization model is established. The research shows that the overall maintenance cost rate will be underestimated without considering the differences in preventive maintenance effectiveness. At the same time, various types of maintenance costs, the proportion factor of damage-type failures and intrinsic fatigue-type failures, and the preventive

收稿日期: 2022-01-24 修回日期: 2022-02-28 录用日期: 2022-08-10

基金项目: 国家自然科学基金(51835001), 机械传动国家重点实验室自主研究课题(SK-LMT-ZZKT-2021R06)

作者简介: 黎新龙(1993-), 博士生, 从事维修决策与优化研究.

通信作者: 张根保, 教授, 博士生导师; E-mail: gen.bao.zhang@263.net.

maintenance effect parameter have a significant influence on the formulation of maintenance strategy. This research has a certain guiding role in formulating the sequential preventive maintenance strategy of meta-action unit and reducing its maintenance cost.

**Key words:** preventive maintenance; meta-action unit; generalized geometric process (GGP); sequential maintenance; imperfect maintenance

预防性维修在一定程度上能够降低设备发生故障的概率,减少停机损失,在工程中被广泛应用<sup>[1-2]</sup>. 通常,预防性维修可以分为基于时间的预防性维修和基于状态的预防性维修. 随着传感技术的发展,基于状态的预防性维修受到了广泛关注. 但状态维修较高的成本投入和相关技术要求<sup>[3]</sup>,对一些不便于状态监测和维修预算较少的重要设备,基于时间的预防性维修依然是当前维修策略中不可或缺的一种重要手段. 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非等周期预防性维修(顺序维修). 相比等周期预防性维修,顺序预防性维修更能节省维修成本<sup>[4]</sup>. 因此,不少学者对顺序预防性维修展开了研究. Nakagawa<sup>[4]</sup>最早提出了顺序预防性维修,指出顺序预防性维修比定期预防性维修更具实用性;Zhu 等<sup>[5]</sup>针对系统在不确定非周期变化应力下的设计和维修问题,提出了一种集系统设计和顺序预防性维修计划于一体的两阶段随机规划模型,能有效降低设备的维修成本;Zhou 等<sup>[6]</sup>提出了一种顺序不完全预防性维修模型来量化城市公交车的维修效率,对城市公交维修管理决策与优化具有重要意义. 顺序预防性维修策略<sup>[7-8]</sup>受到了极大的重视并取得了不错的效果,有效减少了设备维护成本,但还存在一些问题值得进一步研究. 首先,上述模型通常假设预防性维修对可修设备所有类型的故障都起作用,它能够降低设备的总体故障率或者有效役龄. 但实际上,由于预防性维修都是一些比较固定的操作(清洗、更换机油等),其对磨损等损伤类故障能起到较好的作用,但对疲劳断裂等本质疲劳类故障却影响甚微<sup>[9]</sup>,没考虑到这点制定的维修策略可能产生不必要的维修费用. 其次,在以往的维修策略中,维修决策对象通常选择的是一个部件或者系统. 部件或者系统结构复杂包含的零件数过多,粒度过大,制定的维修决策不够精准,容易造成过维修而浪费维修资源. 同时,也不便于故障的诊断和定位. 例如,传统的故障定位到了齿轮箱,然而齿轮箱包含很多个零部件并不能明确齿轮箱发生故障的部位,还需要进行进一步的诊断与检测,花费的时间较多. 张根保等<sup>[10-11]</sup>提出了元动作理论. Yu 等<sup>[12-13]</sup>和 Zhang

等<sup>[14]</sup>将设备通过“功能-运动-动作”结构化分解方法得到元动作单元,相比部件或者系统,元动作单元拥有更少的零件和更简单的结构,便于故障诊断与定位;Yu 等<sup>[15]</sup>基于元动作找出了机械系统所有的潜在故障模式,避免了故障模式和故障原因的混淆,便于故障分析;Zhang 等<sup>[16]</sup>研究了基于元动作的故障诊断方法. 这些难点问题的解决为研究基于元动作单元的维修奠定了基础. 以元动作单元为维修决策对象制定的维修策略更加精准,一定程度上能避免过维修,充分利用设备的使用寿命.

基于以上考虑,以元动作单元为预防性维修决策对象,考虑预防性维修的不完美性及其对不同类型故障维修效果的差异,基于广义几何过程 (GGP)<sup>[17-18]</sup>建立了元动作单元的顺序预防性维修模型,确定了元动作单元在给定最大预防性维修次数下的最优维修策略. 最后,分析了维修成本等因数对最优维修成本率以及最优维修策略的影响.

1 模型假设

(1) 对元动作单元采用顺序预防性维修 ( $N, x_1, \cdots, x_N$ ) 和修复性维修相结合的维修策略. 以  $x_1, x_2, \cdots, x_N$  为维修时间间隔对元动作单元进行预防性维修,在第  $N$  次预防性维修时对元动作单元进行更换,使其修复如新. 当元动作单元出现故障时,对元动作单元进行修复性维修(最小维修),使其恢复到故障之前的状态.

(2) 元动作单元中存在两类故障:损伤类故障和本质疲劳类故障. 预防性维修对可以降低损伤类故障的故障率,但对本质的疲劳类故障不起作用.

(3) 元动作单元损伤类故障最小维修成本为  $c_m^1$ , 本质疲劳类故障最小维修成本为  $c_m^2$ ,预防性维修成本为  $c_p$ ,更换成本为  $c_r, c_m^1 < c_p < c_r, c_m^2 < c_p < c_r$ .

(4) 元动作单元初始时刻处于全新状态,故障率为 0.

(5) 各类型维修操作时间相对元动作单元寿命很短,因此忽略不计.

2 元动作单元故障率描述

考虑元动作单元中存在损伤类故障和本质疲劳

类故障<sup>[9]</sup>,假设元动作单元总的故障率函数为

$$\lambda(t) = u(t) + v(t) \quad (1)$$

式中:  $t$  表示时间;  $u(t)$  表示元动作单元损伤类故障的故障率函数;  $v(t)$  表示元动作单元本质疲劳类故障的故障率函数。

一般情况下机电产品初始故障率服从韦布尔分布,则元动作单元总的初始故障率函数为

$$\lambda^0(t) = \alpha\beta t^{\beta-1} \quad (2)$$

式中:  $\alpha$  和  $\beta$  分别为形状参数和尺度参数。

损伤类故障的初始故障率函数  $u(t)$  和本质疲劳故障的初始故障率函数  $v(t)$  可表示为

$$\left. \begin{aligned} u^0(t) &= e\alpha\beta t^{\beta-1} \\ v^0(t) &= f\alpha\beta t^{\beta-1} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中:  $e$  和  $f$  分别为元动作单元损伤类故障和本质疲劳故障的比例因子,满足  $e + f = 1$ 。

### 3 GGP 及 GGP 预防性维修

GGP 是基于几何过程(GP)的扩展,在设备运行时间建模方面更灵活,它维修能够反映预防性维修对系统维修效果的变化<sup>[17-18]</sup>。同时,它能很好地描述预防性维修的不完美性以及维修效果随着预防性维修次数的增加而减弱的现象。因此,采用 GGP 建立元动作单元的顺序预防性维修模型。

#### 定义 1 GGP

设  $\{Z_k, k \geq 1\}$  为非负随机变量序列,  $k = 1, 2, 3, \dots$  时,如果  $Z_{k+1}/Z_k = a_k$ ,则当  $\{Z_k, k \geq 1\}$  满足以下条件时,其服从 GGP<sup>[17-18]</sup>。

(1) 随机变量之间相互独立。

(2) 对任意整数  $k \geq 1, a_k > 0$ 。

(3) 当  $k \geq 1$  时,存在  $F_k(t) = F(a_0, a_1, \dots, a_{k-1}t)$ ,  $a_0 = 1, F(t)$  是  $Z_1$  的累积分布函数,  $F_k(t)$  是  $Z_k$  的累积分布函数。

当  $a_k$  恒等于 1 时,  $Z_1 = Z_2 = \dots = Z_k, \{Z_k, k \geq 1\}$  是一个更新过程;当  $a_k$  恒小于 1 时,  $Z_1 < Z_2 < \dots < Z_k, \{Z_k, k \geq 1\}$  是一个递增 GGP;当  $a_k$  恒大于 1 时,  $Z_1 > Z_2 > \dots > Z_k, \{Z_k, k \geq 1\}$  是一个递减 GGP。

#### 定义 2 GGP 预防性维修

设  $\{Z_k, k \geq 1\}$  表示元动作单元预防性维修的时间间隔序列,如果  $\{Z_k, k \geq 1\}$  满足 GGP 的条件,那么,预防性维修被称为“GGP 预防性维修”。考虑现实中预防性维修效果随其维修次数的增加而减弱,因此,本文“GGP 预防性维修”的参数  $a_k$  递增,  $1 \leq a_1 \leq a_2 \leq \dots \leq a_k$ 。同时,考虑预防性维修仅对损伤类故障起作用,故本文 GGP 预防性维修只能调整损伤类故障的故障率。当  $\alpha = 0.01, \beta = 2.5, a_1 = 1, a_2 = 1.2, e = 0.9, f = 0.1$  时,预防性维修前后元动作单元各故障率函数的变化如图 1 所示。其中,PM 表示预防性维修,  $u^k(t)$  表示损伤类故障在第  $k$  个预防性维修周期的故障率函数,  $v^k(t)$  表示本质疲劳类故障在第  $k$  个预防性维修周期的故障率函数。由于预防性维修对本质疲劳类故障不起作用,因此  $v^k(t)$  在整个时间段内都是同一个函数。  $\lambda^k(t)$  表示元动作单元在第  $k$  个预防性维修周期总的故障率函数,  $k = 1, 2$ 。

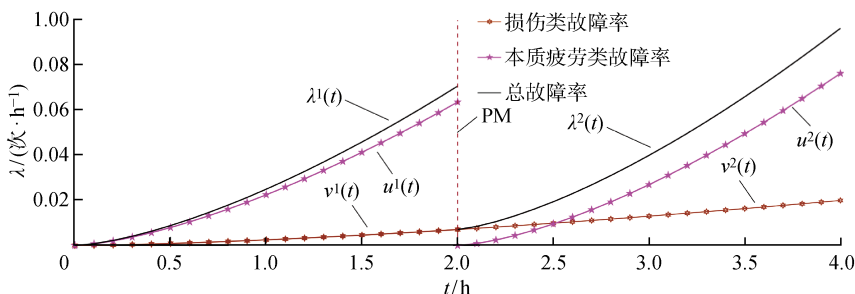


图 1 预防性维修前后元动作单元故障率的变化情况

Fig. 1 Changes of failure rate of meta-action unit before and after preventive maintenance

根据 Wang 等<sup>[17-18]</sup>研究,可推得元动作单元损伤类故障在第  $k$  个预防性维修周期上的故障率函数  $u^k(t)$  为

$$\left. \begin{aligned} u^k(t) &= A_k u^0(A_k t) \\ u^0(A_k t) &= e\alpha\beta(A_k t)^{\beta-1} \\ A_k &= \prod_{j=0}^{k-1} a_j \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

假设元动作单元第  $k$  个预防性维修周期为  $x_k$ ,那么在第  $k$  个预防性维修周期内期望故障的总次数为

$$H_k(x_k) = \int_0^{x_k} u^k(t) dt = e\alpha A_k^\beta (x_k)^\beta \quad (5)$$

### 4 顺序预防性维修建模

元动作单元经历  $N-1$  个周期长度分别为  $x_1,$

$x_2, \dots, x_{N-1}$  的不完全预防性维修,再经历  $x_N$  进行第  $N$  次预防性维修时对元动作单元进行更换,使其修复如新. 则在整个更新周期内,其维修成本率可以表示为

$$C(N, x_1, \dots, x_N) = \frac{c_r + c_p(N-1) + c_m^1 N_m^1 + c_m^2 N_m^2}{\sum_{k=1}^N x_k} \tag{6}$$

式中:  $N_m^1$  表示一个更新周期内对损伤类故障进行最小维修的总次数;  $N_m^2$  表示一个更新周期内对本质疲劳类故障进行最小维修的总次数.  $N_m^1$  和  $N_m^2$  可进一步分别表示为

$$N_m^1 = \sum_{k=1}^N \int_0^{x_k} u^k(t) dt = \sum_{k=1}^N e\alpha A_k^\beta (x_k)^\beta \tag{7}$$

$$N_m^2 = \int_0^{\sum_{k=1}^N x_k} v^0(t) dt = f\alpha \left(\sum_{k=1}^N x_k\right)^\beta \tag{8}$$

用式(6)对  $x_k$  求偏导,并令其等于 0,可得:

$$\frac{\partial C(N, x_1, \dots, x_N)}{\partial x_k} = 0 \Rightarrow c_m^1 u^N(x_N) + c_m^2 v^0 \sum_{k=1}^N x_k = C(N, x_1, x_2, \dots, x_N) \tag{9}$$

用式(6)分别对  $x_1, x_2, \dots, x_k$  求偏导,并令其等于 0,则可得:

$$\left. \begin{aligned} c_m^1 u^1(x_1) + c_m^2 v^0 \sum_{k=1}^N x_k &= C(N, x_1, x_2, \dots, x_N) \\ c_m^1 u^2(x_2) + c_m^2 v^0 \sum_{k=1}^N x_k &= C(N, x_1, x_2, \dots, x_N) \\ &\dots \\ c_m^1 u^N(x_N) + c_m^2 v^0 \sum_{k=1}^N x_k &= C(N, x_1, x_2, \dots, x_N) \end{aligned} \right\} \tag{10}$$

由式(10)推出:

$$u^1(x_1) = u^2(x_2) = \dots = u^N(x_N) \tag{11}$$

令  $u^1(x_1) = u^2(x_2) = \dots = u^N(x_N) = D$ , 推出:

$$x_k = \left(\frac{D}{e\alpha A_k^\beta \beta}\right)^{\frac{1}{\beta-1}}, \quad k = 1, 2, \dots, N \tag{12}$$

将式(12)代入式(10)中任意一个方程,从而可推出:

$$D^{\frac{\beta}{\beta-1}} = [(N-1)c_p + c_r] / \left[ c_m^1 \left(1 - \frac{1}{\beta}\right) (e\alpha\beta)^{\frac{1}{\beta-1}} \sum_{k=1}^N \left(\frac{1}{A_k}\right)^{\frac{\beta}{\beta-1}} \right] +$$

$$\frac{f}{e} c_m^2 (e\alpha\beta)^{\frac{1}{\beta-1}} \left\{ \left[ \sum_{k=1}^N \left(\frac{1}{A_k}\right)^{\frac{\beta}{\beta-1}} \right]^{\beta-1} \times \sum_{k=1}^N \left(\frac{1}{A_k}\right)^{\frac{\beta}{\beta-1}} - \frac{1}{\beta} \left[ \sum_{k=1}^N \left(\frac{1}{A_k}\right)^{\frac{\beta}{\beta-1}} \right]^\beta \right\} \tag{13}$$

考虑到在实际应用中对元动作单元进行预防性维修的次数  $N$  是有限的,假设最大维修次数为  $N_{\max}$ . 因此,每给定一个  $N$  值,通过式(13)即可得到  $D$ ,将  $D$  代入式(12)即可得到最优的预防性维修周期序列  $(x_1^*, x_2^*, \dots, x_N^*)$ ,从而得到最优维修成本率  $C^*$ . 因此,本文的优化模型如下:

$$\left. \begin{aligned} \min C(N, x_1, x_2, \dots, x_N) \\ \text{s. t. } N \in \mathbf{N}^* \\ 1 \leq N \leq N_{\max} \end{aligned} \right\} \tag{14}$$

利用搜索方法,可以找出元动作单元的最优维修策略  $(N^*, x_1, \dots, x_{N^*})$ ,求解算法流程如图 2 所示.

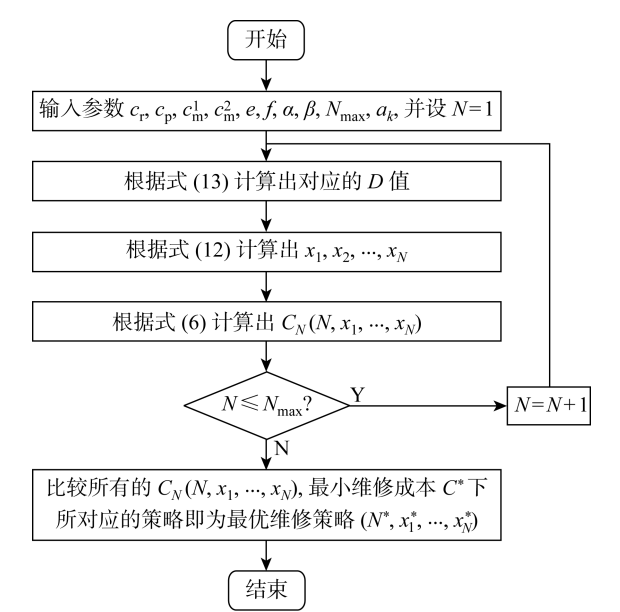


图 2 求解算法流程图  
Fig. 2 Flow chart of solution algorithm

5 算例分析

预防性维修效果主要体现在比率  $a_k$  上.  $a_k$  越大,预防性维修效果越差,反之维修效果越好. Wang 等<sup>[17]</sup>考虑实际中预防性维修效果随着维修次数的增加呈现减弱的趋势,预防性维修效果参数  $a_k$  的取值为

$$a_k = e^{\nu k} \tag{15}$$

式中:  $k = 0, 1, 2, \dots, N$ ;  $a_k > 1$  表示预防性维修效果随着预防性维修次数的增多而减弱;  $\nu$  为调整因子,  $\nu > 0$ ,  $\nu$  越大预防性维修效果相对越差.

取模型参数如下:元动作单元更换费用  $c_r = 1\,000$  元,预防性维修成本  $c_p = 200$  元,损伤类故障最小维修成本  $c_m^1 = 50$  元,本质疲劳类故障最小维修成本  $c_m^2 = 60$  元,韦布尔分布形状参数  $\alpha = 0.01$ ,尺度参数  $\beta = 1.5$ . 根据 Sun 等<sup>[9]</sup> 研究可知,损伤类故障和本质疲劳两种故障的比例大约为 9 : 1. 故本文中,元动作单元损伤类故障比例因子  $e = 0.9$ ,本质疲劳类故障比例因子  $f = 0.1$ . 最大预防性维修次数  $N_{\max} = 100$ ,调整因子  $\nu = 0.01$ .

当模型取上述值时,通过对本文模型进行求解可知,最优维修成本率  $C^*$  随最优维修次数  $N^*$  的变化如图 3 所示,最优维修成本率  $C^*$  随最优维修次数  $N^*$  的增加先增加而后减小. 最优维修次数  $N^* = 5$  时,维修成本率取最小值,  $C^* = 9.67$  (元/h),此时对应的最优预防性维修周期依次为  $x_1 = 248.68$  h,  $x_2 = 168.11$  h,  $x_3 = 133.17$  h,  $x_4 = 110.46$  h,  $x_5 = 92.69$  h. 若对元动作单元采用完美更换策略,其他参数同上,得到最优维修成本率为  $C^* = 12.06$  元/h,最优维修周期为 248.68 h. 由此可见,在一个更新周期内,采用完美更换策略的成本率更高,本研究的维修策略更优. 若不考虑预防性维修对本质疲劳类和损伤类故障影响的差异,即取  $e = 1$ ,  $f = 0$ ,其他参数不变. 求得最优维修成本率  $C^* = 8.70$  元/h,最优维修次数  $N^* = 8.70$ ,对应的最优预防性维修周期依次为  $x_1 = 251.98$  h,  $x_2 = 175.69$  h,  $x_3 = 142.23$  h,  $x_4 = 119.93$  h,  $x_5 = 101.94$  h,  $x_6 = 86.10$  h,  $x_5 = 71.72$  h. 由此看出,若没有考虑元动作单元存在的本质疲劳类故障,预防性维修效果被高估,得到的最优维修策略的预防性维修次数偏高,维修成本率偏小.

维修成本是制定维修策略的一个重要影响因素,不同类型维修成本的变化可能会导致最优维修策略的改变. 下面讨论各类型维修成本的变化对最优维修策略及最优维修成本率的影响.

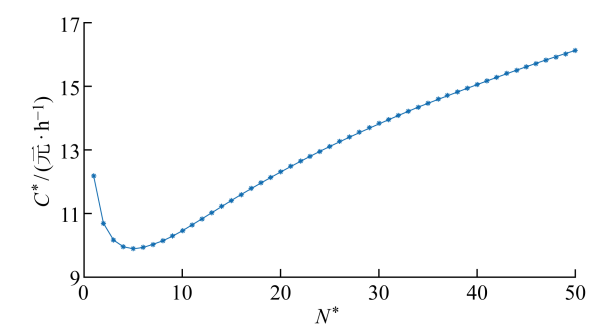


图 3 最优维修成本率随最优维修次数的变化  
Fig. 3 Change of optimal maintenance cost rate

表 1 结果表明,随着  $c_m^1$  的增加,  $C^*$  逐渐增加;  $N^*$  随着  $c_m^1$  的增加而呈现增加的趋势. 随着  $c_m^1$  的增加,  $c_p$  相对减小. 预防性维修对损伤类故障起作用,通过增加预防性维修次数,减少损伤类故障的发生次数达到降低维修成本率的目的;更新周期长度随着  $c_m^1$  的增加而呈现减小的趋势. 通过缩短更新周期长度减少损伤类故障的总次数,从而降低维修成本率.

表 2 结果表明,随着  $c_m^2$  的增加,  $C^*$  逐渐增加;  $N^*$  随着  $c_m^2$  的增加而呈现减小的趋势. 这是因为预防性维修不能对本质疲劳类故障起作用,随着  $c_m^2$  的增加,预防性维修所带来的经济效益相对减弱,通过适当减小  $N^*$  以降低维修成本率;更新周期长度随着  $c_m^2$  的增加而减小. 通过缩短更新周期的长度,尽量减少本质疲劳类故障的发生次数以降低维修成本率.

表 3 结果表明,随着  $c_p$  的增加,  $C^*$  逐渐增加. 但当  $c_p$  接近更换成本  $c_r$  时,这时直接采取更换策略 ( $N^* = 1$ ),  $C^*$  保持在 12.06 元/h;  $N^*$  随着  $c_p$  的增加而减小. 通过减小预防性维修次数,节省维修成本从而降低维修成本率. 当  $c_p$  接近更换成本  $c_r$  时,直接采取更换策略,  $N^* = 1$  保持不变;更新周期长度随着  $c_p$  的增加而呈现减小的趋势. 这是因为  $c_p$  较高时,最小维修成本就相对越低,可适当缩短更新周期降低总体的维修成本率. 但当  $c_p$  接近更换成本  $c_r$  时,直接采取更换策略 ( $N^* = 1$ ),更新周期长度保持不变.

表 4 结果表明,随着  $c_r$  的增加,  $C^*$  逐渐增加;  $N^*$  随着  $c_r$  的增加而呈现增加的趋势.  $c_r$  越高,  $c_p$  就相对越低,这时可以通过适当增加预防性维修次数以降低总体的维修成本率;在  $N^*$  相同的条件下,更新周期长度随着  $c_r$  的增加而增加. 这是因为  $c_r$  较高时,  $c_m^1$  和  $c_m^2$  就相对越低,可适当延长更新周期降低总体的维修成本率.

不同元动作单元损伤类故障与疲劳类故障比例不尽一致,下面讨论故障比例因子变化对最优维修策略的影响. 在其他参数不变的情况下,调整故障比例因子  $e$  和  $f$ ,得到的结果如表 5 所示.

由表 5 可得,随着  $e$  的增加和  $f$  的减少,  $C^*$  逐渐减少. 一方面因为本研究设定  $c_m^1 < c_m^2$ ,所以在相同条件下,  $C^*$  随着  $e$  的增加而逐渐减少. 另一方面,随着  $e$  的增加,预防性维修干预的效果越好. 通过预防性维修干预,元动作单元发生总的故障次数减少. 因此,  $C^*$  逐渐减少;  $N^*$  随着  $e$  的增加而呈现增加的趋势. 这是因为  $e$  越大,预防性维修干预的效果越

表 1 损伤类故障最小维修成本  $c_m^1$  对最优维修策略的影响

Tab. 1 Influence of minimal maintenance cost  $c_m^1$  of damage-type failures on optimal maintenance strategy

$c_m^1$ /元	$C^*/(\text{元} \cdot \text{h}^{-1})$	$N^*$	维修间隔时间序列, $x_1, \cdots, x_k/\text{h}$	更新周期长度/h
10	4.94	3	562.29, 354.81, 269.32	1 186.42
20	6.33	4	411.04, 268.80, 208.41, 170.22	1 058.46
30	7.54	5	332.41, 221.08, 173.26, 142.59, 118.94	988.28
40	8.64	5	283.04, 190.11, 149.95, 123.98, 103.79	850.87
50	9.67	5	248.68, 168.11, 133.17, 110.46, 92.69	753.10
60	10.65	6	223.14, 151.53, 120.41, 100.1, 84.145, 70.46	749.80
70	11.58	6	203.29, 138.52, 110.33, 91.88, 77.33, 64.82	686.17
80	12.45	6	187.34, 127.98, 102.12, 85.16, 71.75, 60.19	634.53
90	13.33	6	174.18, 119.24, 95.284, 79.54, 67.08, 56.31	591.64
100	14.16	6	163.12, 111.86, 89.49, 74.77, 63.10, 53.00	555.33

表 2 本质疲劳类故障最小维修成本  $c_m^2$  对最优维修策略的影响

Tab. 2 Influence of minimal maintenance cost  $c_m^2$  on optimal maintenance strategy for intrinsic fatigue-type failures

$c_m^2$ /元	$C^*/(\text{元} \cdot \text{h}^{-1})$	$N^*$	维修间隔时间序列, $x_1, \cdots, x_k/\text{h}$	更新周期长度/h
10	8.39	6	266.39, 184.66, 148.86, 125.11, 106.07, 89.40	920.48
20	8.65	6	262.60, 181.03, 145.36, 121.80, 103.01, 86.66	900.45
30	8.92	6	258.94, 177.57, 142.05, 118.69, 100.16, 84.12	881.54
40	9.17	6	255.40, 174.27, 138.93, 115.78, 97.51, 81.77	863.65
50	9.43	6	251.98, 171.12, 135.98, 113.04, 95.02, 79.56	846.70
60	9.67	5	248.68, 168.11, 133.17, 110.46, 92.69	753.10
70	9.91	5	245.48, 165.23, 130.51, 108.02, 90.49	739.72
80	10.14	5	242.38, 162.46, 127.97, 105.70, 88.42	726.94
90	10.37	5	239.38, 159.82, 125.56, 103.51, 86.46	714.73
100	10.60	5	236.47, 157.27, 123.25, 101.43, 84.61	703.04

表 3 预防性维修成本  $c_p$  对最优维修策略的影响

Tab. 3 Influence of preventive maintenance cost  $c_p$  on optimal maintenance strategy

$c_p$ /元	$C^*/(\text{元} \cdot \text{h}^{-1})$	$N^*$	维修间隔时间序列, $x_1, \cdots, x_k/\text{h}$	更新周期长度/h
100	8.76	7	248.68, 158.63, 120.17, 96.17, 78.38, 63.97, 51.80	817.83
200	9.67	5	248.68, 168.11, 133.17, 110.46, 92.69	753.10
300	10.33	4	248.68, 177.32, 145.57, 123.86	695.43
400	10.85	4	248.68, 186.30, 157.46, 136.58	729.02
500	11.25	3	248.68, 195.07, 168.92	612.66
600	11.60	2	248.68, 203.65	452.32
700	11.84	2	248.68, 212.05	460.72
800	12.06	1	248.68	248.68
900	12.06	1	248.68	248.68
1 000	12.06	1	248.68	248.68

好. 通过增加预防性维修次数减少故障的发生, 从而降低维修成本率;  $e$  越大, 更新周期长度越长.  $e$  越大, 预防性维修作用越明显, 适当增加预防性维修次数延长更新周期以降低维修成本率.

预防性维修效果参数  $a_k$  对最优维修成本率和最优维修策略可能存在影响, 在本算例中,  $a_k$  是由

调整因子 $\nu$ 决定的. 因此, 下面讨论调整因子 $\nu$ 的变化对最优维修策略的影响. 在其他参数不变的情况下, 变动调整因子 $\nu$ , 得到的结果如表 6 所示.

表 6 结果表明, 随着 $\nu$ 的增加,  $C^*$  逐渐增加, 但当 $\nu$ 增加到一定值后,  $C^*$  保持不变. 这是因为, 预防性维修效果随着 $\nu$ 的增加而变差, 在相同条件下故

表 4 更换成本  $c_r$  对最优维修策略的影响

Tab. 4 Influence of replacement cost  $c_r$  on optimal maintenance strategy

$c_r$ /元	$C^*/(\text{元} \cdot \text{h}^{-1})$	$N^*$	维修间隔时间序列, $x_1, \dots, x_k/\text{h}$	更新周期长度/h
200	7.05	1	85.05	85.05
300	7.87	2	111.44, 93.781	205.22
400	8.29	3	135.00, 105.90, 91.70	332.60
500	8.61	4	156.66, 117.36, 99.19, 86.04	459.25
600	8.86	4	176.91, 128.29, 106.41, 91.18	502.78
700	9.10	5	196.05, 138.77, 113.39, 96.17, 82.07	626.47
800	9.30	5	214.31, 148.87, 120.17, 101.05, 85.68	670.07
900	9.49	5	231.81, 158.63, 126.75, 105.81, 89.22	712.22
1 000	9.67	5	248.68, 168.11, 133.17, 110.46, 92.69	753.10

表 5 故障比例因子对最优维修策略的影响

Tab. 5 Influence of failure scale factor on optimal maintenance strategy

$e$	$f$	$C^*/(\text{元} \cdot \text{h}^{-1})$	$N^*$	维修间隔时间序列, $x_1, \dots, x_k/\text{h}$	更新周期长度/h
0.1	0.9	13.29	1	225.66	225.66
0.2	0.8	13.14	1	228.25	228.25
0.3	0.7	12.99	1	230.91	230.91
0.4	0.6	12.69	2	233.65, 139.68	373.32
0.5	0.5	11.27	2	236.47, 144.39	380.86
0.6	0.4	11.79	3	239.38, 149.52, 112.84	501.73
0.7	0.3	11.20	3	242.38, 155.13, 118.72	516.22
0.8	0.2	10.8	4	245.48, 161.29, 125.43, 102.65	634.85
0.9	0.1	9.67	5	248.68, 168.11, 133.17, 110.46, 92.69	753.10
1.0	0	8.70	7	251.98, 175.69, 142.23, 119.93, 101.94, 86.104, 71.72	949.61

表 6 调整因子  $\nu$  的变化对最优维修策略的影响

Tab. 6 Influence of adjustment factor  $\nu$  change on optimal maintenance strategy

$\nu$	$C^*/(\text{元} \cdot \text{h}^{-1})$	$N^*$	维修间隔时间序列, $x_1, \dots, x_k/\text{h}$	更新周期长度/h
0.02	9.93	4	248.68, 164.87, 125.12, 96.99	635.65
0.04	10.27	4	248.68, 158.5, 110.1, 74.06	591.33
0.06	10.48	3	248.68, 152.27, 96.51	497.46
0.08	10.66	3	248.68, 146.19, 84.29	479.16
0.1	10.83	3	248.68, 140.27, 73.36	462.31
0.3	11.60	2	248.68, 89.64	338.32
0.5	12.06	1	248.68	248.68
0.7	12.06	1	248.68	248.68
0.7	12.06	1	248.68	248.68

障发生的次数增多而导致维修成本率增加. 当  $\nu$  增加到一定值时, 预防性维修效果已经非常差, 直接对元动作单元进行更换效果更好, 这时  $C^*$  保持在 12.06 元/h 不变;  $N^*$  随着  $e$  的增加而呈现减小的趋势, 更新周期长度随着  $e$  的增加而减少, 但当  $\nu$  增加到一定值后,  $N^*$  和更新周期都保持不变. 这是因为随着预防性维修效果变差, 适当减少预防性维修次数、缩短更新周期可以减少维修成本率. 当  $\nu$  增加到一定值时, 对元动作单元直接更换的维修方式成本效益更佳, 因而  $N^*$  和更新周期不再随  $e$  的增加而变化.

## 6 结论

基于 GGP, 考虑预防性维修对损伤类和本质疲劳类故障维修效果的差异, 建立了元动作单元的顺序预防性维修优化模型, 并分析了各类型维修成本、故障比例因子以及调整因子对最优维修决策的影响, 研究结果表明:

(1) 相比更换维修策略, 本文模型得到的预防性维修策略的维修成本率更低.

(2) 不考虑预防性维修对不同类型故障维修效果的差异会低估元动作单元的维修成本率, 得到不准确的维修策略.

(3) 随着各种维修成本 ( $c_m^1$ ,  $c_m^2$ ,  $c_p$ ,  $c_r$ ) 的增加, 最优维修费用率也会相应增加. 最优维修次数  $N^*$  随着  $c_m^1$  和  $c_r$  而呈现增加的趋势, 随着  $c_m^2$  和  $c_p$  的增加而减少. 元动作单元中损伤类故障过程占比越高, 预防性维修效果越明显, 增加预防性维修次数可以降低维修成本率. 调整因子  $\nu$  越高则预防性维修效果越差, 适当减少预防性维修次数、缩短更新周期在一定条件下可以降低维修成本率.

本文虽然取得了一定的成果, 但依然存在一些不足: 模型中没有考虑维修时间, 这可能会影响模型的精度; 只考虑了单个元动作单元的预防性维修策略, 对多个元动作单元的维修策略有待进一步研究.

## 参考文献:

- [1] 杜煜, 李雨青, 张秀芳, 等. 考虑广义时间价值的串行退化生产系统维护更新策略 [J]. 上海交通大学学报, 2020, 54(5): 465-472.  
DU Yu, LI Yuqing, ZHANG Xiufang, *et al.* Preventive maintenance and replacement policy for series deteriorating production system considering generalized time value [J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2020, 54(5): 465-472.
- [2] 郝虹斐, 郭伟, 桂林, 等. 非完美维修情境下的预防

性维修多目标决策模型 [J]. 上海交通大学学报, 2018, 52(5): 518-524.

HAO Hongfei, GUO Wei, GUI Lin, *et al.* A multi-objective preventive maintenance decision-making model for imperfect repair process [J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2018, 52(5): 518-524.

- [3] WANG H Z. A survey of maintenance policies of deteriorating systems [J]. *European Journal of Operational Research*, 2002, 139(3): 469-489.
- [4] NAKAGAWA T. Periodic and sequential preventive maintenance policies [J]. *Journal of Applied Probability*, 1986, 23(2): 536-542.
- [5] ZHU X Y, BEI X Q, CHATWATTANASIRI N, *et al.* Optimal system design and sequential preventive maintenance under uncertain aperiodic-changing stresses [J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2018, 67(3): 907-919.
- [6] ZHOU Y, KOU G, XIAO H, *et al.* Sequential imperfect preventive maintenance model with failure intensity reduction with an application to urban buses [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2020, 198: 106871.
- [7] DUAN C Q, DENG C, WANG B R. Multi-phase sequential preventive maintenance scheduling for deteriorating repairable systems [J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2019, 30(4): 1779-1793.
- [8] 苏春, 胡照勇, 郑玉巧. 基于可用度约束的风力机单部件顺序维修优化 [J]. 东南大学学报(自然科学版), 2019, 49(1): 110-115.  
SU Chun, HU Zhaoyong, ZHENG Yuqiao. Single part sequential maintenance optimization for wind turbines based on availability constraint [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2019, 49(1): 110-115.
- [9] 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.
- [10] 张根保, 张定飞, 冉琰, 等. 基于 Gamma 和混合 Copula 的元动作单元性能可靠性分析 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2021, 48(4): 113-125.  
ZHANG Genbao, ZHANG Dingfei, RAN Yan, *et al.* Performance reliability analysis of meta-action unit based on gamma process and hybrid copula function [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2021, 48(4): 113-125.
- [11] LI Y L, ZHANG X G, RAN Y, *et al.* Reliability and modal analysis of key meta-action unit for CNC



- machine tool [J]. **IEEE Access**, 2019, 7: 23640-23655.
- [12] YU H, ZHANG G B, RAN Y, *et al.* A reliability allocation method for mechanical product based on meta-action [J]. **IEEE Transactions on Reliability**, 2020, 69(1): 373-381.
- [13] 张根保, 冉琰, 庾辉, 等. 机械产品可靠性研究的新进展: 元动作可靠性理论 [J]. **制造技术与机床**, 2022(1): 53-59.
- ZHANG Genbao, RAN Yan, YU Hui, *et al.* New progress in reliability research of mechanical products-reliability theory of meta-action [J]. **Manufacturing Technology & Machine Tool**, 2022(1): 53-59.
- [14] ZHANG W, ZHANG G B, RAN Y, *et al.* The full-state reliability model and evaluation technology of mechatronic product based on meta-action unit [J]. **Advances in Mechanical Engineering**, 2018, 10(5): 1-11.
- [15] YU H, ZHANG G B, RAN Y. A more reasonable definition of failure mode for mechanical systems using meta-action [J]. **IEEE Access**, 2018, 7: 4898-4904.
- [16] ZHANG X G, ZHANG G B, LI Y L, *et al.* A novel fault diagnosis approach of a mechanical system based on meta-action unit [J]. **Advances in Mechanical Engineering**, 2019, 11(2): 1-12.
- [17] WANG G J, ZHANG Y L, YAM R C M. Preventive maintenance models based on the generalized geometric process [J]. **IEEE Transactions on Reliability**, 2017, 66(4): 1380-1388.
- [18] WANG G J, YAM R C M. Generalized geometric process and its application in maintenance problems [J]. **Applied Mathematical Modelling**, 2017, 49: 554-567.

(本文编辑:李博文)