

# 可靠性及动态维修成本下的定期预防维修研究

## Periodic Preventive Maintenance Based on Reliability and Dynamic Maintenance Cost

西北工业大学管理学院 赵永强 梁工谦

**[摘要]** 良好的设备维修策略对企业的竞争力有着重要的影响。设备维修需要考虑可靠性和维修成本的问题。首先,假设设备的故障率服从威布尔分布,设备的预防维修成本会随着维修次数的增加而增加;随后构建了可靠性水平有限且预防维修成本变化情况下的定期预防维修模型,在使总成本最小的前提下,求出了最优的预防维修次数和预防维修周期;最后以实例验证了模型的有效性。

**关键词:** 可靠性 定期预防维修 威布尔分布 动态维修成本

**[ABSTRACT]** Good equipment maintenance policy has the important influent to the competitive force of the enterprise. Equipment maintenance needs to consider the reliability and maintenance cost. First, assuming the equipment failure obeys Weibull distribution, the equipment preventive maintenance cost will increase with maintenance frequency. Then, the periodic preventive maintenance model based on limited reliability and variable maintenance cost is build. The optimal preventive maintenance frequency and preventive maintenance cycle are found on the condition of minimizing the total maintenance cost. Finally, the example demonstrates the effectiveness of the model.

**Keywords:** Reliability Periodic preventive maintenance Weibull distribution Dynamic maintenance cost

设备的有效运行是保证企业正常生产的根本,而设备的状态也决定了企业产品质量的好坏,设备维修对企业十分重要。设备维修大致经历了3个阶段。早期阶段以事后维修为主,机器发生故障后才修理,是一种被动管理;到70年代后期,由于设备自动化程度逐步提高,多数设备以定期维修为主,定期对设备进行检查、检修,以及时发现问题,定期维修存在周期难以确定的问题;到80年代以后,顾客成为企业服务的核心,企业的一切活动以顾客为中心展开,设备维修以预防为主,通过主动服务,保证设备的运营与企业经营目标一致,达到满足企业需求的目的。由于设备昂贵且复杂,预防维

修可以节约很大的维修成本。预防维修又分为预防置换和预防维护。对设备进行置换使其恢复到全新状态称为预防置换,对设备进行维护使其恢复到较好的状态则为预防维护。由于其回复程度介于全新状态和最小修复状态,因此这种预防维护又称为不完全预防维修。

在基于可靠性预防维修方面,很多学者进行了大量的研究。国内学者贾希胜等探讨了基于可靠性的维修决策模型的基本设想<sup>[1]</sup>;苏春等以广义维修成本最低为目标,以设备可用度为约束条件,以维修周期为优化变量,提出了以可靠性为中心的设备维修成本优化模型<sup>[2]</sup>;金垚等建立了一种基于系统可靠性限制的预防维护策略与经济生产批量整合模型,导出使长期单位时间期望成本最小的最优预防维护策略<sup>[3]</sup>;杨春节等综合考虑了预防维护成本、设备年龄以及维护过程学习效应等因素的影响,在可靠度的限制下,得出了最优维护时间间隔的计算模型<sup>[4]</sup>;Bertling.L等建立了可靠度条件下的电力设备的预防维修模型,并分析了预防维修对电力输送的影响<sup>[5]</sup>;Celso Marcelo F. Lapa等讨论了基于可靠性和最小成本条件下的预防维修模型,并通过基因算法求出了维修次数和周期<sup>[6]</sup>;Amir Khanlari等利用模糊理论讨论了设备在可靠性条件下的有限预防维修次序<sup>[7]</sup>。

在设备的维修过程中,都必须要考虑维修的经济性问题,单纯考虑成本或可靠性是不够的,因为设备的维修状态、维修成本会随着时间的变化而变化。从以上文献中可以看到,多数研究都考虑了可靠度的问题,研究都是设定了可靠性有限的条件下的预防维修策略,并没有考虑预防维修成本变化的情况。而且,周期预防维修在企业中的应用与设备管理的实际情况比较符合。因此,本文研究了可靠性水平有限且预防维修成本发生变化情况下的定期预防维修模型,通过模型分析,求出了最优的预防维修次数及预防维修周期。

## 1 参数的设定及假设

### 1.1 假设条件

(1) 将设备看作一个整体的维修单位,不考虑零部件失效的问题;

(2) 设备的故障率会随着使用时间的增加而增加;

(3) 假设设备预防维修时间很短,所以维修时间忽略不计;

(4) 如果在预防维修周期内发生故障,则进行最小修复,且最小修复不改变设备故障率;

(5) 用改善因子来衡量设备预防维修后的有效年龄,且改善因子受预防维修成本的影响;

(6) 不考虑设备执行预防维修及最小修复花费的时间。

### 1.2 动态预防维修成本

假设  $c_{pm}$  为每次的预防维修成本,由于设备逐步老化,所以要使设备维修后可靠性回复,预防维修成本就会相应逐步增加。设备的预防维修成本由固定成本、变动成本构成,分别用  $c_f$ 、 $c_v$  代表,固定成本一般不变,所以,预防维修成本可以用下式表示:

$$c_{pm} = c_f + ic_v, \quad (1)$$

式中,  $i$  代表第  $i$  次预防维修,可以看到预防维修成本随着维修次数的增加而增加。设备在预防维修后不可能达到初始状态,维修次数越多,老化速度就越快,用改善因子  $\eta_i$  来代表回复程度:

$$\eta_i = (a \cdot c_{pm})^{bi}, \quad i=1,2,3,\dots,N-1, \quad (2)$$

式中,  $N$  代表可靠度限制下的可预防维修次数;  $a$  为预防维修成本的调整参数,  $0 < a < \frac{1}{c_{pm}}$ ;  $b$  是预防维修次数的调整参数,  $0 < b < 1$ ;  $c_{pm}$  越大,  $\eta_i$  越大,说明设备维修回复程度高;  $i$  越大,  $\eta_i$  越小,表示预防维修后的设备回复程度低。

## 2 面向可靠性及动态维修成本的定期预防维修模型构建

### 2.1 可靠度函数的确定

如果设备的预防维修周期为  $x$ ,那么每次预防维修后的有效时间都会受  $\eta_i$  的影响。通过分析发现维修前、维修后及第  $i$  个维修周期有效年龄分别为:

$$T_i^-(x) = \left[ \sum_{j=1}^{i-1} \prod_{k=j}^{n-1} (1 - \eta_k) + 1 \right] x, \quad (3)$$

$$T_i^+(x) = \sum_{j=1}^i \left[ \prod_{k=j}^n (1 - \eta_k) \right] x, \quad (4)$$

当  $i=0$  时,  $T_i^-(x) = T_i^+(x) = 0$ 。

$$T_i(t) = T_i^+(ix) + t' = t + \left\{ \sum_{j=1}^i \left[ \prod_{k=j}^n (1 - \eta_k) \right] - i \right\} x, \quad (5)$$

$$ix \leq t \leq (i+1)x。$$

假设设备故障密度函数服从威布尔分布,维修前、维修后及第  $i$  个周期的故障率函数分别为:

$$\lambda_i^-(x) = \alpha\beta \left( \sum_{j=1}^{i-1} \prod_{k=j}^{n-1} (1 - \eta_k) + 1 \right) x^{\beta-1}, \quad (6)$$

$$\lambda_i^+(x) = \alpha\beta \left( \sum_{j=1}^i \left[ \prod_{k=j}^n (1 - \eta_k) \right] \right) x^{\beta-1}, \quad (7)$$

$$\lambda_i(t) = \alpha\beta \left( t + \left\{ \sum_{j=1}^i \left[ \prod_{k=j}^n (1 - \eta_k) \right] - i \right\} x \right)^{\beta-1}, \quad (8)$$

其中,  $\beta$  称为形状参数(Shape Parameter)、 $\alpha$  为尺度参数(Scale Parameter),两参数均需大于零。 $\beta > 1$  时,表示磨损故障率;  $\beta = 1$  时,表示恒定的随机故障率,这时  $\lambda$  为常数;  $\beta < 1$  时,表示早期故障率。

维修前、维修后及第  $i$  个周期的可靠度函数分别比

$$R_i^-(x) = \exp -\alpha \left( \sum_{j=1}^{i-1} \prod_{k=j}^{n-1} (1 - \eta_k) + 1 \right) x^\beta, \quad (9)$$

$$R_i^+(x) = \exp -\alpha \left( \sum_{j=1}^i \left[ \prod_{k=j}^n (1 - \eta_k) \right] \right) x^\beta, \quad (10)$$

$$R_i(t) = \exp -\alpha \left( t + \left\{ \sum_{j=1}^i \left[ \prod_{k=j}^n (1 - \eta_k) \right] - i \right\} x \right)^\beta. \quad (11)$$

### 2.2 模型构建

设备的预防维修周期及维修次数都会受到可靠度的影响,设备在预防置换点  $T$  的可靠度  $R(T)$  可用下式表述:

$$R(T) = \exp - \left\{ \sum_{i=1}^{N-2} \int_{T_i^-}^{T_{i+1}^-} \lambda(t) dt \right\} + \int_{T_{N-1}^-}^{T_N^-(x)} \lambda(t) dt, \quad (12)$$

$$\text{令 } \delta(x, N) = \exp - \left\{ \sum_{i=1}^{N-2} \int_{T_i^-}^{T_{i+1}^-} \lambda(t) dt \right\} + \int_{T_{N-1}^-}^{T_N^-(x)} \lambda(t) dt,$$

则  $R(T) = \exp -\delta(x, N) = R_{\min}$ ,  $R_{\min}$  为设备的最小可靠度,则可求出维修周期  $x^*$ :

$$x^* = \delta^{-1}(-\ln R_{\min}, N), \quad (13)$$

将  $x^*$  代入其总成本函数,则有:

$$C(x^*, N) = \frac{c_{mr} \sum_{i=0}^{N-1} \int_{T_i^-(x^*)}^{T_{i+1}^-(x^*)} \lambda(t) dt + \sum_{i=1}^{N-1} c_{pm_i} + C_{pr}}{Nx^*}, \quad (14)$$

式中,  $c_{mr}$  为每次最小修复成本,  $c_{pr}$  每次预防置换成本。

当  $C(x, N)$  满足  $\begin{cases} C(x, N+1) \geq C(x, N) \\ C(x, N) < C(x, N-1) \end{cases}$  条件时,  $N$  即为最优的维修次数。

### 3 最优预防维修参数的计算

面向可靠性及动态维修成本的定期预防维修的最优预防维修次数及周期的计算步骤如下:

- (1) 设定模型中的参数值及可靠度最小值  $R_{\min}$ 。
- (2) 令  $N=1$ , 代入 (13) 式求出  $x$  值, 再将  $x$  值代入 (14) 式可得到  $C(x, N)$  值。
- (3) 令  $C_{\min-1} = C(x, N)$ 。
- (4) 令  $N = N+1$ 。
- (5) 将  $N$  值代入 (13) 式, 求  $x$  值; 再将  $x, N$  代入成本函数之 (14) 式, 求得  $C(x, N)$  值。
- (6) 若  $C(x, N) < C_{\min-1}$ , 则  $N^* = N, x_1^* = x$ , 然后返回步骤 (3); 反之, 记录最优解  $N^*, x_1^* C(x, N)$ , 结束求解。

### 4 实例分析

现以某大型数控设备为例, 对模型进行分析。数控设备自动化高, 可靠性的高低直接影响生产的准确性。数控设备的故障率函数服从威布尔分布, 具体参数为:  $\alpha=2, \beta=2, C_{pr}=100000000, c_{mr}=600000, c_f=80000, c_v=800, a=20, b=0.005$ , 通过计算可以得出表 1。

表1 不同可靠度下的最优预防维修周期及次数

最小可靠度	最佳维修次数 / 次	维修周期 / h	维修成本 / 元
0.999295	4	1250	83200
0.999237	6	833	84800
0.999174	8	625	86400
0.999142	9	556	87200
0.999107	10	500	88000
0.999036	12	417	89600
0.998998	13	385	90400
0.998919	15	333	92000
0.998877	16	313	92800
0.99879	18	278	94400

根据表 1 可以画出图 1、图 2。从图 1 可以看到, 最小可靠度越高, 数控设备的预防维修次数越少; 最小可靠度越低, 数控设备的预防维修次数越多; 随着最小可靠度的降低, 数控设备的预防维修次数增加。这与实际数控设备的预防维修属性是一致的。如果生产企业可

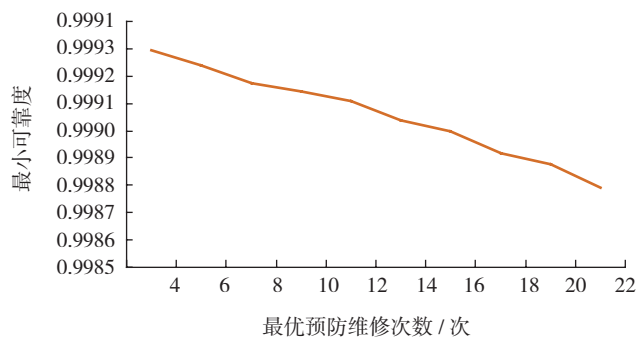


图1 维修次数与可靠度关系图

Fig.1 Relation between maintenance frequency and reliability

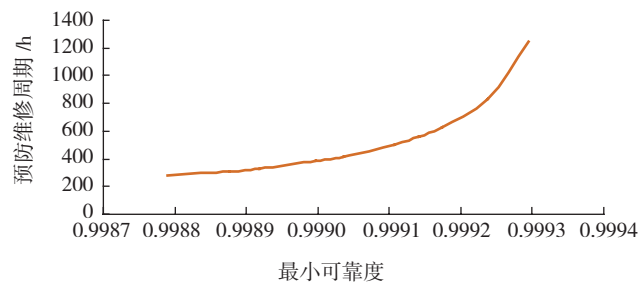


图2 维修周期与可靠度关系图

Fig.2 Relation between maintenance cycle and reliability

以根据自身对数控设备的服务水平得出设备的最小可靠度, 依据本模型即可求出预防维修总成本最小时的最优预防维修次数和周期, 显然预防维修成本远比置换成本低很多。

从图 2 可以看出, 最小可靠度越小, 预防维修周期越短; 最小可靠度越大, 维修周期越长。原因在于, 最小可靠度越小, 设备的可使用年限就会越长, 为了保障设备的有效性, 预防维修次数就会增加, 频次增加的结果会使维修周期缩短。

### 5 结论

由于现代产品日益复杂, 使得设备系统既复杂又庞大, 良好的设备维修及管理已经成为企业在日益激烈的市场竞争环境下生存的关键。在假设设备故障率服从威布尔分布、预防维修成本会随着维修次数增加而增大的情况下, 构建了一个可靠性水平有限情况下的定期预防维修模型。在已知最小可靠度的条件下, 首先求出最优的预防维修周期; 随后在使总成本最小的前提下, 求出了最优的维修次数, 为企业进行预防维修提供了支持; 最后以实例进行分析, 得出随着最小可靠度的降低, 设备的预防维修次数增加, 最小可靠度越小, 预防维修周期越短。这些结果与实际的设备维修属性是一致的, 证明了模型的有效性。 (下转第 95 页)

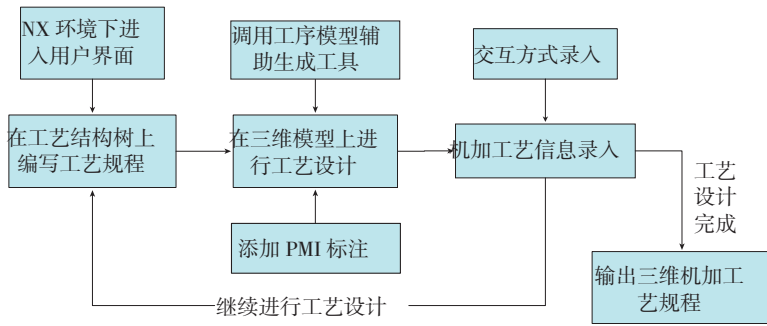


图4 工艺设计流程图  
Fig.4 Process design flow chart

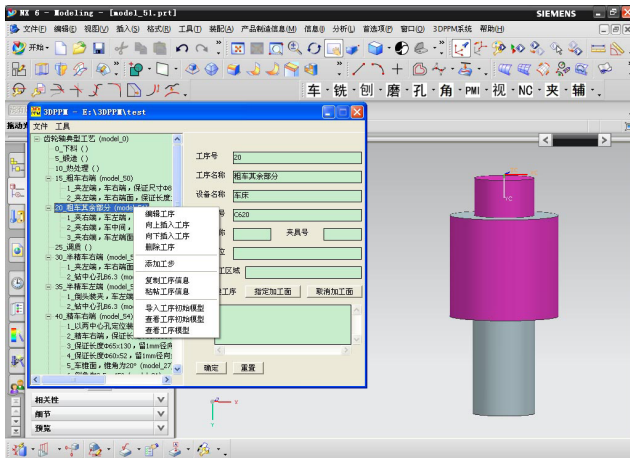


图5 系统界面  
Fig.5 System interface

行工艺设计。

以一个齿轮轴为例,工艺员在工艺结构树界面上利用右键菜单工具进行工艺过程设计与编辑、浏览工艺模型等操作,工艺卡片界面则显示选中工艺节点的卡片信息(初始化为空值),如图5所示。系统利用XML实现工艺结构树三级节点的结构化存储,并记录相应节点的工艺信息。当工艺员进行工艺设计时,XML将实时更新工艺结构树的存储结构,并自动收集工艺结构树节点属性信息、关联的工艺卡片信息以及对应的工艺模型名称等<sup>[11]</sup>。

另外借助NX PMI解决方案,将原来在二维工程图上标示的特征信息和加工工艺要求直接嵌入到三维工艺模型中,并通过定制特定的视图有针对性、全方位地展示三维模型的机加工工艺信息。

#### 4 结束语

基于三维CAD进行工艺设计是当前先进制造技术领域研究的热点之一。本文结合我国航空制造企业的具体需求,研究在三维环境下进行工艺设计及工艺信息

集成的新方法。系统运用工艺结构树组织系统结构,将三维模型作为工艺信息载体与信息集成来源,在三维环境下表达和集成工艺信息,并结合系统实例进行了验证。

#### 参考文献

- [1] 张振明. 现代CAPP的应用与发展趋势. CAD/CAM与制造业信息化, 2004(1):30-31.
- [2] 刘艳斌, 赵海兵. 基于3D-CAPP技术及其发展研究. 机械制造, 2006, 44(9):14-16.
- [3] 贾晓亮, 田锡天, 耿俊浩, 等. 航空复杂产品基于三维产品模型的集成化CAPP系统研究. 制造业自动化, 2009, 31(2):82-85.
- [4] 吴江. 基于特征识别的CAD/CAPP集成技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2005.
- [5] 赵震, 夏芳臣, 涂海宁, 等. 基于三维CAD过程特征的CAPP系统研究. 装备制造技术, 2010(5):80-81.
- [6] 黄利江, 张振明, 田锡天, 等. 产品工艺信息的集成与应用. 航空制造技术, 2008(2):75-77.
- [7] 徐正, 张国军, 邵新宇. 三维环境下CAD/CAPP集成方法研究. 机械设计与制造, 2008(8):55-57.
- [8] 周秋忠, 范玉青. 基于EBOP的复杂产品工艺数据模型研究. 制造业自动化, 2008, 30(8):15-18.
- [9] 张述初. 工艺信息自动汇总的研究与实践[D]. 武汉: 华中科技大学, 2003.
- [10] 程璞. UG环境下基于加工特征的三维CAPP系统开发[D]. 西安: 西安工业大学, 2009.
- [11] 蔡长韬. 基于STEP/XML的集成化工艺信息描述方法研究. 计算机集成制造系统, 2008, 14(5):912-917.

(责编 小城)

(上接第91页)

#### 参考文献

- [1] 贾希胜, 贾云献, 温亮. 以可靠性为中心的维修及其模型支持. 机械工程学院学报, 2004, 16(1):15-19.
- [2] 苏春, 黄苗. 以可靠性为中心的维修成本优化模型及其应用. 机械科学与技术, 2007, 26(12):1556-1559.
- [3] 杨春节, 童晟, 孙长生, 等. 基于可靠度约束的混合预防性维修模型. 浙江大学学报, 2008, 42(8): 1376-1379.
- [4] 金焱, 王莹, 潘尔顺. 基于可靠度限制的PM与EPQ整合模型. 工业工程与管理, 2010, 15(5):65-69.
- [5] Bertling L, Allan R, Eriksson R. A reliability-centered asset maintenance method for assessing the impact of maintenance in power distribution systems. IEEE Transactions, 2005, 20 (1): 75-82.
- [6] Celso Marcelo F. Lapa, Claudio Marcio N.A. A model for preventive maintenance planning by genetic algorithms based in cost and reliability. Reliability Engineering & System Safety, 2006, 91(2):233-240.
- [7] Amir Khanlari, Kaveh Mohammadi, Babak Sohrabi. Prioritizing equipments for preventive maintenance activities using fuzzy rules. Computers & Industrial Engineering, 2008, 54(2):169-184.

(责编 亦非)