基于三阶段时间延迟模型的设备预防维修策略

刘勤明，李永朋，叶春明

引用本文:
刘勤明, 李永朋, 叶春明. 基于三阶段时间延迟模型的设备预防维修策略[J]. 控制与决策, 2020, 35(7): 1780-1786.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1692

文章编号: 1001-0920(2020)07-1780-07 **DOI:** 10.13195/j.kzyjc.2018.1692

基于三阶段时间延迟模型的设备预防维修策略

刘勤明†, 李永朋, 叶春明

(上海理工大学 管理学院，上海 200093)

摘 要: 针对设备劣化过程中出现多种非正常状态的问题,提出基于三阶段时间延迟理论的设备维修模型. 首先,设备从缺陷到故障的过程并不只服从同一分布,因此,基于三阶段时间延迟模型,将设备故障分为初始缺陷、严重缺陷和故障3个状态,不同阶段定义不同的分布函数以模拟设备的劣化过程;其次,分析设备缺陷、故障发生的时刻与阈值时间点之间的关系,对维修情况进行分类,建立维修总期望费用模型,以单位时间维修费用最小为决策目标,求解出最佳预防维修周期时间和最佳阈值时间;最后,利用遗传算法求解数学模型,通过算例分析验证模型的有效性. 所提出方法有助于企业根据维修计划定期进行预防维修检测,根据不同情况对设备出现的初始缺陷状态和严重缺陷状态进行预防维修.

关键词: 预防维修；三阶段时间延迟；威布尔分布；故障率；健康状态；遗传算法

中图分类号: F224；F273.4 **文献标志码:** A

Preventive maintenance plan of equipment based on three-stage time delay model

LIU Qin-ming†, *LI Yong-peng*, *YE Chun-ming*

(Business School，University of Shanghai for Science and Technology，Shanghai 200093，China)

Abstract: Aiming at the problem of that many abnormal conditions may occur in the process of equipment deterioration, a maintenance model based on the three-stage time delay theory is proposed. Firstly, because the process from equipment defect to failure does not obey the same distribution, based on the three-stage time delay model, the health status of the equipment can be classified to original defect, serious defect and failure. Different distribution functions are defined at different stages to simulate the deterioration process of the equipment. Then, the relationship between the time of equipment defect and failure and the threshold time point is analyzed, and the maintenance situation is classified. The model with the lowest maintenance cost per unit time is established to find out the best preventive maintenance cycle time and the optimal threshold time. Finally, the genetic algorithm is used to solve the proposed model. The effectiveness of the model is verified by a case. It is helpful for enterprises to carry out preventive maintenance inspection regularly according to the maintenance plan, and to prevent and repair the initial defect state and serious defect state of the equipment according to different conditions.

Keywords: preventive maintenance；three-stage time delay；Weibull distribution；failure rate；health status；genetic algorithm

0 引 言

随着当今社会科学技术的日益发展和工业4.0时代的到来,越来越多的制造业向着智能工厂、智能生产的目标转型,投入到企业生产中的设备也变得越来越复杂、精细. 这些昂贵的设备随着使用时间的增长和本身寿命的损耗会产生故障,从而导致不合格产品的出现,甚至出现停机,造成生产计划和生产线的中断,使得利润受损. 关键设备因事故停机造成的损失极为严重,因此,设备的可靠性和有效性将直接影响企业的正常生产.

1960 年, Barlow 等[1] 就曾提出设备维修的最优化问题这一研究课题,率先将设备维修管理问题进行模型化阐述. 之后,又对维修点检测策略进行了初步研究[2]. 贾希胜[3] 以可靠性为中心对设备维修策略进行了分类. 在对设备可靠性和设备劣化进行合理的模拟化研究后, Blischke 等[4] 将维修方式分为预防性

收稿日期: 2018-12-11；**修回日期:** 2019-02-17.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (71840003, 71471116, 71632008)；教育部人文社会科学研究青年基金项目 (15YJCZH096)；上海市自然科学基金项目 (19ZR1435600).

责任编委: 刘士新.

†通讯作者. E-mail: lqm0531@163.com.

维修和修复性维修两种方式. 由于预防性维修着力于在故障还未发生时就消灭故障,制定良好的预防维修计划能够大大减少企业设备维修上的投入. 而故障发生后采取被动的修复性维修成本较高[5]. Zuo等[6]将设备工作时间、设备故障的时间点和故障设备的数量作为模型参数,模拟了相应的维修模型.

将时间延迟理论应用于建立设备维修费用和预防维修检测间隔周期之间相互关系这一领域,有着很多成熟的研究成果. 文献[7-9]通过这种关系确定最优维修间隔,证明了时间延迟理论在预防维修领域中的正确性和有效性. 在时间延迟模型的缺陷故障率分布函数的选择上出现了两种领域: 文献[10-12]在缺陷发生过程呈现齐次泊松分布上,研究了预防维修策略的最优维修周期; 而文献[13-15]基于缺陷的出现符合非齐次泊松分布的情况下,模拟出预防维修模型.

从以上分析可以看出,基于时间延迟理论的预防维修策略得到了广泛的认可. 但以往的研究分析中,大多将设备出现故障或潜在出现故障时的状态分为缺陷状态和故障状态两种,进而用连续性随机分布函数模拟生产系统从缺陷到故障的过程. 然而,在实际生产中,设备可能出现多种非正常状态,从缺陷到故障的过程也并不只服从同一分布.

综上,本文使用三阶段时间延迟模型模拟设备劣化过程,将设备故障分为初始缺陷、严重缺陷和故障3个状态,模拟故障随机过程. 通过对设备可能出现的各种非正常状态的研究,创新性地将维修费用与设备状态相关联,设备的初始缺陷、严重缺陷和故障状态将带来不同的维修代价,建立维修总期望费用模型,求解最佳预防维修的时间间隔和阈值时间. 通过对设备劣化过程更复杂、更贴切的函数来进行模拟,更加具有现实意义.

1　问题描述

一般时间延迟模型将设备状态分为缺陷状态和故障状态. 而本文中三阶段时间延迟模型将缺陷状态细分为初始缺陷状态和严重缺陷状态,共有初始缺陷状态、严重缺陷状态和故障状态. 并且,三阶段时间延迟模型将延迟时间细分为初始延迟时间和严重延迟时间.

设备延迟维修的阈值时间是控制维修行为发生的时间,针对设备不同程度的缺陷状态,采取不同的预防维修策略. 在阈值时间DT之前发生的所有初始缺陷会统一延迟到DT时刻进行预防维修; 对于在DT时刻之前发生的所有严重缺陷,都应立即采取预防维修措施,避免故障的发生; 发生在阈值时间DT之后的缺陷无论初始缺陷还是严重缺陷,都应立即采取预防维修. 因此,与两阶段时间延迟模型相比,三阶段模型下,当预防检测查出缺陷时,并非一定采取预防维修措施,而是要考虑缺陷的严重程度,只有当故障发生时,需立即进行故障维修.

2　符号说明

X : 设备正常运行阶段;

$f_x(x)$: 设备从初始状态到出现初始缺陷状态过程的概率密度函数;

$F_x(x)$: 设备从初始状态到出现初始缺陷状态过程的累积分布函数;

Y: 设备初始缺陷运行阶段;

$f_y(y)$: 设备从初始缺陷状态到严重缺陷状态过程的概率密度函数;

$F_y(y)$: 设备从初始缺陷状态到严重缺陷状态过程的累积分布函数;

Z: 设备严重缺陷运行阶段;

$f_z(z)$: 设备从严重缺陷状态到出现故障状态过程的概率密度函数;

$F_z(z)$: 设备从严重缺陷状态到出现故障缺陷状态过程的累积分布函数;

T_x: 设备发生初始缺陷的时刻;

T_y: 设备发生严重缺陷的时刻;

T_z: 设备发生故障的时刻;

C_r: 每次预防维修的平均检测费用;

C_x: 每次对初始缺陷状态下的设备进行预防维修的平均费用;

C_y: 每次对严重缺陷状态下的设备进行预防维修的平均费用;

C_z: 每次对故障设备进行故障维修的平均费用;

$\mathrm{EC}_m(T, D)$: 设备在整个更新周期下的总期望维修费用,其中T、D为函数变量;

$\mathrm{EC}_n(T, D)$: 设备使用中分别在第n种情况下的期望维修费用,其中$n = 1, 2, \ldots$;

$\mathrm{ET}_m(T, D)$: 设备发生故障维修或预防维修的总期望更新周期时间,其中T、D为函数变量;

$\mathrm{ET}_n(T, D)$: 设备分别在第n种情况下发生故障维修或预防维修的期望更新周期时间,其中$n = 1, 2, \ldots$;

$P(\mathrm{con})$: 发生某种情况的概率函数, con表示可能出现的各种情况;

N: 一个无穷大的正整数;

N^*: 正整数集;

T: 预防维修的周期时间间隔;

DT: 延迟维修阈值时间.

3 基于三阶段时间延迟的预防维修模型

将设备从开始运行到检测出缺陷或故障停机的时间称为更新时间,即一个更新周期. 在一个更新周期内,设备单位时间的维修费用=总维修费用/更新时间. 假设在第k个预防维修周期内设备会出现初始缺陷状态,即$(k-1)T < T_x < kT$,其中$k = 1, 2, \ldots, \infty$. 根据初始缺陷状态、严重缺陷状态和故障状态可能出现的时间T_x、T_y、T_z以及预防维修周期T与阈值时间DT的关系,预防维修存在以下6种情况.

3.1 $(k-1)T < T_y, T_z < kT$的情况

若在初始缺陷发生区间内设备又接连发生了严重缺陷和故障,则设备就会在第k次预防维修检测前发生故障停机. 这种情况下,设备未能被及时检测出可能发生故障,因此采取事后性的故障维修.

T_y、T_z都在$((k-1)T, kT)$内的概率为

$$P((k-1)T < T_y < T_z < kT) = \int_{(k-1)T}^{kT}\int_0^{kT-x}\int_0^{kT-x-y} f_x(x)f_y(y)f_z(z)\mathrm{d}z\mathrm{d}y\mathrm{d}x = \int_{(k-1)T}^{kT} f_x(x)\int_0^{kT-x} f_y(y)F_z(kT-x-y)\mathrm{d}y\mathrm{d}x,$$
$$k = 1, 2, \ldots, N. \tag{1}$$

该情况下,设备维修费用为$(k-1)$次预防维修检测费用与一次故障维修费用之和,即$(k-1)C_r + C_z$,因此,设备在整个更新周期中的期望维修费用为

$$\mathrm{EC}_1(T, D) = \sum_{k=1}^{\infty}\Big\{((k-1)C_r + C_z)\times \int_{(k-1)T}^{kT} f_x(x)\int_0^{kT-x} f_y(y)F_z(kT-x-y)\mathrm{d}y\mathrm{d}x\Big\}. \tag{2}$$

设备的运行时间为从起始时刻到设备故障时刻的长度,即$(k-1)$个预防维修周期时间加上第k个周期中设备发生故障的延迟时间. 因此,更新周期时间为$T_z = (k-1)T + u$,其中$0 < u < T$,期望更新周期时间为

$$\mathrm{ET}_1(T, D) = \int_0^T((k-1)T+u)P(((k-1)T+u) < T_y < T_z < (kT+u))\mathrm{d}u = \sum_{k=1}^{\infty}\Big\{\int_0^T((k-1)T+u)\int_{(k-1)T}^{kT} f_x(x)\times \int_0^{kT-x+u} f_y(y)F_z(kT-x-y+u)\mathrm{d}y\mathrm{d}x\mathrm{d}u\Big\}. \tag{3}$$

因此,维修费用模型为

$$\min\Big\{\frac{\mathrm{EC}_1(T, D)}{\mathrm{ET}_1(T, D)}\Big\};$$
$$\text{s.t. } k \in N^*,\ T > 0,\ 0 < k < N. \tag{4}$$

3.2 $(k+i-1)T < T_y, T_z < (k+i)T$且$k+i < D$的情况

在这种情况下,第k次预防维修检测出了设备处于初始缺陷状态. 由于未到阈值时间,并不需要立即采取预防维修. 因此,如果在阈值时间点DT之前的某一个预防维修周期内,该初始缺陷变为严重缺陷,进而产生故障,则设备未来得及等到DT时刻进行初始缺陷的预防维修,也没有及时检测到严重缺陷,设备就已经产生了故障.

T_y、T_z都在$((k+i-1)T, (k+i)T)$内的概率为

$$P((k+i-1)T < T_y < T_z < (k+i)T) = \int_{(k-1)T}^{kT}\int_{(k+i-1)T-x}^{(k+i)T-x}\int_0^{(k+i)T-x-y} f_x(x)f_y(y)\times f_z(z)\mathrm{d}z\mathrm{d}y\mathrm{d}x = \int_{(k-1)T}^{kT} f_x(x)\int_{(k+i-1)T-x}^{(k+i)T-x} f_y(y)F_z((k+i)T - x-y)\mathrm{d}y\mathrm{d}x,$$
$$i, k = 1, 2, \ldots, N,\ k+i < D. \tag{5}$$

该情况下,设备维修费用为$(k+i-1)$次预防维修检测费用与一次故障维修费用之和,即$(k+i-1)C_r + C_z$,因此,设备在整个更新周期中的期望维修费用为

$$\mathrm{EC}_2(T, D) = \sum_{k=1}^{D-1}\sum_{i=1}^{D-k}\{((k+i-1)C_r + C_z)P((k+i-1)T < T_y < T_z < (k+i)T)\} = \sum_{k=1}^{D-1}\sum_{i=1}^{D-k}\Big\{((k+i-1)C_r + C_z)\int_{(k-1)T}^{kT} f_x(x)\times \int_{(k+i-1)T-x}^{(k+i)T-x} f_y(y)F_z((k+i)T-x-y)\mathrm{d}y\mathrm{d}x\Big\}. \tag{6}$$

设备的更新时间为从起始时刻到设备故障时刻的长度,即$(k+i-1)$个预防维修周期时间加上第$(k+i)$个周期中设备发生故障的延迟时间. 因此,更新周期时间为$T_z = (k+i-1)T + u$,其中$0 < u < T$. 期望更新周期时间为

$$\mathrm{ET}_2(T, D) = \int_0^T((k+i-1)T+u)P(((k+i-1)T+u) <$$

$$T_y < T_z < ((k+i)T+u))\mathrm{d}u = \sum_{k=1}^{D-1}\sum_{i=1}^{D-k}\Big\{\int_0^T((k+i-1)T+u)\int_{(k-1)T}^{kT}f_x(x)\times \int_{(k+i-1)T-x}^{(k+i)T-x+u}f_y(y)F_z((k+i)T- x-y+u)\mathrm{d}y\mathrm{d}x\mathrm{d}u\Big\}. \tag{7}$$

综上,维修费用模型为

$$\min\Big\{\frac{\mathrm{EC}_2(T,D)}{\mathrm{ET}_2(T,D)}\Big\};$$
$$\text{s.t. } k,D\in N^*,\ T>0,\ i+k<D. \tag{8}$$

3.3 $T_z > T_y > \mathrm{DT}$且$k<D$的情况

在前两种情况下设备均发生了故障,此时,第k次预防维修检测出设备处于初始缺陷状态,但并未立即进行预防维修. 而初始缺陷状态下的设备直到阈值时刻DT时,都没有出现严重缺陷. 由于阈值时间已到,应立即采取预防维修. 该预防维修针对的对象是初始缺陷状态下的设备.

$T_z > T_y > \mathrm{DT}$,即只需$T_y > \mathrm{DT}$的概率为

$$P(T_y>\mathrm{DT}) = \int_{(k-1)T}^{kT}\int_{\mathrm{DT}-x}^{\infty}f_x(x)f_y(y)\mathrm{d}y\mathrm{d}x = \int_{(k-1)T}^{kT}f_x(x)(1-F_y(\mathrm{DT}-x))\mathrm{d}x,$$
$$k=1,2,\ldots,D. \tag{9}$$

设备在DT时刻正处于初始缺陷状态. 在阈值时刻会对设备出现的所有缺陷状态采取预防维修,在该情况下,就会触发一次针对初始缺陷的预防维修活动,设备维修费用为DC_r+C_x. 该情况与3.1节和3.2节相比,阈值时间的预防维修可以使设备避免产生故障,减少更新周期内的维修费用,而期望维修费用为

$$\mathrm{EC}_3(T,D) = \sum_{k=1}^{D}(DC_r+C_x)P(T_y>\mathrm{DT}) = \sum_{k=1}^{D}(DC_r+C_x)\int_{(k-1)T}^{kT}f_x(x)(1- F_y(\mathrm{DT}-x))\mathrm{d}x. \tag{10}$$

设备处于初始缺陷状态,直到阈值时间DT进行预防维修,即一次更新. 故设备的更新时间为DT. 因已知$T_y > \mathrm{DT}$的概率,故该情况下的期望更新周期时间为

$$\mathrm{ET}_3(T,D) = \sum_{k=1}^{D}\mathrm{DT}\int_{(k-1)T}^{kT}f_x(x)(1-F_y(\mathrm{DT}-x))\mathrm{d}x. \tag{11}$$

综上,维修费用模型为

$$\min\Big\{\frac{\mathrm{EC}_3(T,D)}{\mathrm{ET}_3(T,D)}\Big\};$$
$$\text{s.t. } k,D\in N^*,\ T>0,\ k\leqslant D. \tag{12}$$

3.4 $(k+i-1)T<T_y<(k+i)T<T_z$且$k+i<D$的情况

这种情况下,第k周期后处于初始缺陷状态下的设备,在之后的第i个预防维修周期中发生了严重缺陷,同时,在这一周期中并未发生故障,于是设备在第$(k+i)T$时刻被检测出严重缺陷,应立即采取预防维修措施. 该预防维修针对的对象与3.3节不同,是处于严重缺陷状态下的设备.

T_y在区间$((k+i-1)T,(k+i)T)$内,且$T_z > (k+i)T$的概率为

$$P((k+i-1)T<T_y<(k+i)T<T_z) = \int_{(k-1)T}^{kT}\int_{(k+i-1)T-x}^{(k+i)T-x}\int_{(k+i)T-x-y}^{\infty}f_x(x)\times f_y(y)f_z(z)\mathrm{d}z\mathrm{d}y\mathrm{d}x = \int_{(k-1)T}^{kT}f_x(x)\int_{(k+i-1)T-x}^{(k+i)T-x}f_y(y)(1- F_y((k+i)T-x-y))\mathrm{d}y\mathrm{d}x,$$
$$i,k=1,2,\ldots,N,\ k+i<D. \tag{13}$$

设备在$(k+i)T$时刻,即第$(k+i)$次预防维修检查时,检测出设备处于严重缺陷状态. 根据三阶段时间延迟理论,当预防维修点检测出设备处于严重缺陷状态时,就会立即触发一次预防维修,使设备恢复正常状态,故设备维修费用为$(k+i)C_r+C_y$,期望维修费用为

$$\mathrm{EC}_4(T,D) = \sum_{k=1}^{D-1}\sum_{i=1}^{D-k}\{((k+i)C_r+C_y)P((k+i-1)T< T_y<(k+i)T<T_z)\} = \sum_{k=1}^{D-1}\sum_{i=1}^{D-k}\Big\{((k+i)C_r+C_y)\int_{(k-1)T}^{kT}f_x(x)\times \int_{(k+i-1)T-x}^{(k+i)T-x}f_y(y)(1-F_y((k+i)T-x-y))\mathrm{d}y\mathrm{d}x\Big\}. \tag{14}$$

当设备处于严重缺陷状态,并在第$(k+i)$次预防维修检查中被检测出来时,应立即进行一次更新,故设备更新时间为$(k+i)T$. 因已知该情况发生的概率,故期望更新周期时间为

$$\mathrm{ET}_4(T,D) =$$

$$\sum_{k=1}^{D}(k+i)T\int_{(k-1)T}^{kT}f_x(x)\times$$
$$\int_{(k+i-1)T-x}^{(k+i)T-x}f_y(y)(1-F_y((k+i)T-x-y))\mathrm{d}y\mathrm{d}x. \tag{15}$$

综上,维修费用模型为

$$\min\left\{\frac{\mathrm{EC}_4(T,D)}{\mathrm{ET}_4(T,D)}\right\};$$
$$\text{s.t. } i,k,D\in N^*,\ T>0,\ i+k<D. \tag{16}$$

3.5 $T_y>kT$ 且 $k>D$ 的情况

这种情况下,设备在阈值时间点之前没有发生缺陷,一直处于正常运行状态. 阈值时间后的初始缺陷也应立即采取预防维修措施.

该情况发生的概率与3.3节类似,只是初始缺陷发生的区间在阈值时间之后,故 $(k-1)T<T_x<kT<T_y$ 且 $k>D$ 的概率为

$$P((k-1)T<T_x<kT<T_y)=$$
$$\int_{(k-1)T}^{kT}\int_{kT-x}^{\infty}f_x(x)f_y(y)\mathrm{d}y\mathrm{d}x=$$
$$\int_{(k-1)T}^{kT}f_x(x)(1-F_y(kT-x))\mathrm{d}x,$$
$$k=D+1,D+2,\dots,N. \tag{17}$$

设备在 kT 时刻被检测出处于初始缺陷状态并采取维修,故设备所需的维修费用为 kC_r+C_x,更新周期中的期望维修费用为

$$\mathrm{EC}_5(T,D)=$$
$$\sum_{k=D+1}^{\infty}(kC_r+C_x)P((k-1)T<T_x<kT<T_y)\times$$
$$\sum_{k=D+1}^{\infty}(kC_r+C_x)\int_{(k-1)T}^{kT}f_x(x)(1-F_y(kT-x))\mathrm{d}x. \tag{18}$$

发生缺陷的时间在阈值时间之后,并在第 k 次预防维修检查中被检测到,应立即进行一次更新,故设备更新时间为 kT. 已知该情况发生的概率,期望更新周期时间为

$$\mathrm{ET}_5(T,D)=$$
$$\sum_{k=D+1}^{\infty}kT\int_{(k-1)T}^{kT}f_x(x)(1-F_y(kT-x))\mathrm{d}x. \tag{19}$$

综上,维修费用模型为

$$\min\left\{\frac{\mathrm{EC}_5(T,D)}{\mathrm{ET}_5(T,D)}\right\};$$
$$\text{s.t. } k,D\in N^*,\ T>0,\ k>D. \tag{20}$$

3.6 $(k-1)T<T_y<kT$ 且 $k>D$ 的情况

这种情况下,设备在阈值时间点之前没有发生缺陷,一直处于正常运行状态. 对于阈值时间之后的严重缺陷应立即采取预防维修措施.

该情况发生的概率与3.4节类似,不过初始缺陷和严重缺陷发生在同一个区间内,且该区间在阈值时间之后,故 $(k-1)T<T_x<T_y<kT$ 的概率为

$$P((k-1)T<T_x<T_y<kT)=$$
$$\int_{(k-1)T}^{kT}\int_{0}^{kT-x}\int_{kT-x-y}^{\infty}f_x(x)f_y(y)f_z(z)\mathrm{d}z\mathrm{d}y\mathrm{d}x=$$
$$\int_{(k-1)T}^{kT}\int_{0}^{kT-x}f_x(x)f_y(y)(1-$$
$$F_z(kT-x-y))\mathrm{d}y\mathrm{d}x,$$
$$k=D+1,D+2,\dots,N. \tag{21}$$

设备在 kT 时刻被检测出处于严重缺陷状态,设备所需的维修费用为预防维修检测费用与严重缺陷预防维修费用之和,即 kC_r+C_y,总期望维修费用为

$$\mathrm{EC}_6(T,D)=$$
$$\sum_{k=D+1}^{\infty}(kC_r+C_y)P((k-1)T<T_x<T_y<kT)=$$
$$\sum_{k=D+1}^{\infty}(kC_r+C_y)\int_{(k-1)T}^{kT}\int_{0}^{kT-x}f_x(x)f_y(y)\times$$
$$(1-F_z(kT-x-y))\mathrm{d}y\mathrm{d}x. \tag{22}$$

该情况下的更新时间与3.5节相同,在第 k 次预防维修检查中检测出严重缺陷,并立即进行一次更新,故设备的更新时间为 kT. 由于已知该情况发生的概率,期望更新周期时间为

$$\mathrm{ET}_6(T,D)=$$
$$\sum_{k=D+1}^{\infty}kT\int_{(k-1)T}^{kT}\int_{0}^{kT-x}f_x(x)f_y(y)(1-$$
$$F_z(kT-x-y))\mathrm{d}y\mathrm{d}x. \tag{23}$$

综上,维修费用模型为

$$\min\left\{\frac{\mathrm{EC}_6(T,D)}{\mathrm{ET}_6(T,D)}\right\};$$
$$\text{s.t. } k,D\in N^*,\ T>0,\ k>D. \tag{24}$$

以上是基于三阶段时间延迟理论的预防维修模型中可能出现的所有情况.

基于式(4)、(8)、(12)、(16)、(20)、(24),可得到总期望维修费用模型为

$$\min\left\{\frac{\mathrm{EC}_m(T,D)}{\mathrm{ET}_m(T,D)}\right\}. \tag{25}$$

因此,单位维修费用模型为

$$\min\left\{\frac{\sum\limits_{n=1}^{6}\mathrm{EC}_n(T,D)}{\sum\limits_{n=1}^{6}\mathrm{ET}_n(T,D)}\right\};$$
$$\text{s.t. } i,k,D\in N^*,\ T>0,\ n=1,2,\ldots,6. \tag{26}$$

4　算例分析

考虑一个车床设备的预防维修问题. 根据模型假设,暂不考虑车床设备的使用寿命问题,研究其单位时间的维修费用. 假设设备初始缺陷阶段、严重缺陷阶段和故障阶段呈独立的威布尔分布,分别用$f_x(x)$、$f_y(y)$、$f_z(z)$表示各阶段设备劣化的概率密度函数. 给出威布尔函数定义如下:

$$f(x)=\lambda\alpha(\lambda x^{\alpha-1})\mathrm{e}^{-(\lambda x)^{\alpha}}. \tag{27}$$

用(λ_1,α_1)、(λ_2,α_2)、(λ_3,α_3)分别表示$f_x(x)$、$f_y(y)$、$f_z(z)$的威布尔分布中的参数.

本文故障率分布函数的单位是天,具体见表1.

表1　故障率分布的相关参数

λ_1	α_1	λ_2	α_2	λ_3	α_3
0.009	1.78	0.012	0.65	0.010	2.41

用C_r、C_x、C_y、C_z分别表示冲压机床的预防维修检测单位费用、初始缺陷维修单位费用、严重缺陷维修单位费用和故障维修单位费用,分别给出维修费用(万元)为0.08, 0.4, 0.7, 1.5.

为了简化求解难度,这里仅考虑T为整数的情况. 经过初步简化之后,基于三阶段时间延迟理论的单位维修费用模型即为双整数参数非线性规划问题,使用遗传算法迭代式(26)对模型进行求解.

迭代后部分结果如表2所示. 表2给出了预防维修周期在1天到20天的情况下最优阈值时间,以及求解出的期望单位维修费用. 可以看出,在$T=10$天时,期望单位维修费用达到最低值. 此时的阈值时间为$\mathrm{DT}=3\times10=30$天. 由期望费用随预防维修周期变化的迭代过程可以看出:一开始费用随着预防维修周期数的增加而减少;当预防维修周期达到10周时,总成本最低;之后期望费用又逐渐升高.

表2　不同预防维修周期和阈值时间下的平均维修费用　单位:元

T	D	EC	T	D	EC
1	31	1 157.73	11	3	356.42
2	15	887.90	12	3	407.42
3	9	648.79	13	3	447.50
4	7	589.05	14	2	585.27
5	6	587.80	15	2	667.81
6	5	462.38	16	2	762.52
7	5	419.73	17	2	887.25
8	4	382.59	18	2	872.67
9	3	337.91	19	1	937.42
10	3	317.83	20	1	1 283.65

从实际意义上看,模型结果也与实际相吻合. 特殊地,当$T=1$时,意味着每天都需要进行一次预防维修检测. 这样,虽然能及时发现生产系统中出现的初始缺陷和严重缺陷,但维修和检测过于频繁,每天都会产生预防维修检测费用. 相反,当预防维修周期为20天时,导致预防维修不及时,没有起到防止设备由缺陷变成故障的作用. 这样也会使得设备在运行中故障率上升,经常出现停机故障维修,导致成本过高.

得到最佳预防维修周期数后,下面给出$T=10$时阈值时间取不同值的迭代过程,如表3所示.

表3　$T=10$时,期望费用随阈值时间变化过程　单位:元

D	EC	D	EC
1	517.73	5	445.02
2	375.89	6	539.70
3	317.83	7	629.47
4	391.22	8	702.52

由表3可以看出,期望单位维修费用随阈值时间变化过程也严格服从凹曲线. 从实际意义上看,当阈值时间过短时,三阶段时间延迟模型会趋向于两阶段时间延迟模型. 当$D=1$时,相当于无论初始缺陷还是严重缺陷,都会在预防维修周期处进行维修. 这与两阶段预防维修理论相同. 相反,若阈值时间设置得过长,则每次检查出的初始缺陷由于维修不及时,将可能大概率地转变为严重缺陷,使得维修费用过高.

综上,本算例运用单位维修费用模型,在不考虑设备总使用时间的情况下,得到冲压机床设备的最佳预防维修周期为10天,最佳阈值时间为30天.

5　结　论

本文使用三阶段时间延迟模型解决单机设备的单位时间维修费用最低的问题. 从模型的建立可以看出,将三阶段时间延迟理论应用于模拟设备劣化过程和更新过程,能够较为精细、定量地对设备可能出现的不同种类故障或缺陷进行聚类汇总. 对于此预防维修计划而言,其核心就是计算出最佳预防维修间隔周期和阈值时间. 在实际应用中,企业根据维修计划可以定期进行预防维修检测,根据不同情况对设备出现的初始缺陷状态和严重缺陷状态进行预防

维修. 而对于未能检测出的缺陷转化为故障而导致设备停机的情况,则立即采取故障维修. 相较于传统的预防维修计划,三阶段时间延迟的方法使得其在维修检测过程中对设备状态进行了更细致的划分,能够更好地模拟出更多的设备状态,也更符合实际生产状况. 本文的工作为多状态多部件生产系统的预防维修研究提供了思路.

参考文献(References)

[1] Barlow R E, Hunter L C. Optimum preventive maintenance policies[J]. Operations Research, 1960, 8(1): 90-100.

[2] Barlow R E, Hunter L C. Optimum checking procedures[J]. Journal of the Society for Industrial & Applied Mathematics, 1963, 11(4): 1078-1095.

[3] 贾希胜. 以可靠性为中心的维修决策模型[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 1-5.
(Jia X S. The decision models for reliability centered maintenance[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007: 1-5.)

[4] Blischke W R, Murthy N P. Case studies in reliability and maintenance[M]. New York: John Wiley & Sons, 2003: 623-656.

[5] 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.
(Pei H, Hu C H, Si X S, et al. Remaining life prediction information-based maintenance decision model for equipment under imperfect maintenance[J]. Acta Automatica Sinica, 2018, 44(4): 719-729.)

[6] Zuo H F, Zhang H J, Xiang R. Condition based aero-engine maintenance decision method using proportional hazards model[J]. Journal of Aerospace Power, 2006, 21(4): 716-721.

[7] 董克, 吕文元. 基于历史故障数据的租赁设备预防维护策略优化[J]. 运筹与管理, 2017, 26(5): 119-124.
(Dong K, Lv W Y. Optimal periodic preventive maintenance policy for leased equipment based on history failure data[J]. Operations Research and Management Science, 2017, 26(5): 119-124.)

[8] 董克, 吕文元. 基于历史故障数据的二手设备维护策略优化[J]. 系统管理学报, 2018, 27(3): 478-483.
(Dong K, Lv W Y. Second-hand equipment maintenance strategy optimization based on historical fault data[J]. Journal of Systems & Management, 2018, 27(3): 478-483.)

[9] 刘勤明, 吕文元, 叶春明. 考虑中间库存缓冲区的设备不完美预防维修策略研究[J]. 计算机应用研究, 2018, 35(9): 2614-2616.
(Liu Q M, Lv W Y, Ye C M. Study on preventive maintenance strategy for equipment imperfection considering intermediate inventory buffer[J]. Application Research of Computer, 2018, 35(9): 2614-2616.)

[10] Christer A H, Waller W M. Delay time models of industrial inspection maintenance problems[J]. The Journal of the Operational Research Society, 1984, 35(5): 401-406.

[11] Mahmoudi M, Elwany A, Shahanaghi K, et al. A delay time model with multiple defect types and multiple inspection methods[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2017, 66(4): 1073-1084.

[12] 赵斐, 刘学娟. 考虑不完美维修的定期检测与备件策略联合优化[J]. 系统工程理论与实践, 2017, 37(12): 3201-3214.
(Zhao F, Liu X J. Joint optimization of periodical inspection and spare parts policies considering imperfectmaintenance[J]. System Engineering — Theory & Practice, 2017, 37(12): 3201-3214.)

[13] Christer A H, Lee C, Wang W. A data deficiency based parameter estimating problem and case study in delay time pm modelling[J]. International Journal of Production Economics, 2000, 67(1): 63-76.

[14] Zhao J, Chan A H, Roberts C, et al. Reliability evaluation and optimisation of imperfect inspections for a component with muti-defects[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2007, 92(1): 65-73.

[15] Silva J G D, Lopes R S. An integrated framework for mode failure analysis, delay time model and multi-criteria decision-making for determination of inspection intervals in complex systems[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2018, 51: 17-28.

作者简介

刘勤明 (1984−), 男, 副教授, 博士, 从事健康管理、设备维护等研究, E-mail: lqm0531@163.com;

李永朋 (1994−), 男, 硕士生, 从事故障诊断的研究, E-mail: jonphlee@163.com;

叶春明 (1964−), 男, 教授, 博士生导师, 从事生产调度、模式识别等研究, E-mail: yechm6464@163.com.

(责任编辑: 李君玲)