

文章编号:1006-2467(2020)05-0465-08

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2020.05.003

考虑广义时间价值的串行退化生产系统维护更新策略

杜煜, 李雨青, 张秀芳, 潘尔顺

(上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240)

摘要:以多工序多设备组成的串行生产系统为研究对象,将设备的退化过程看作符合Gamma分布的随机过程,在每次预防性维护时引入机会维护,以减少系统的停机次数;将维护时间看作与设备退化度和维护次数有关的函数,采用退化度恢复因子描述设备维护前后退化度的演变过程;考虑广义时间价值建立设备的成本函数,依据费效比和可用度对设备的维护更新进行联合决策,建立串行生产系统的维护更新模型;算例仿真对维护阈值进行了优化决策,计算出了各设备的更新时间及维护次数.结果表明:广义时间价值会加速设备的老化,缩短设备的使用寿命,从而为企业制定生产系统维护更新策略提供了新思路.

关键词:广义时间价值;串行生产系统;机会维护;更新策略

中图分类号:TH 17

文献标志码:A

Preventive Maintenance and Replacement Policy for Series Deteriorating Production System Considering Generalized Time Value

DU Yu, LI Yuqing, ZHANG Xiufang, PAN Ershun

(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: A series production system consisting of multiple processes and facility was studied considering degradation process as a random process in line with Gamma distribution. Opportunistic maintenance was introduced when preventive maintenance (PM) was conducted to reduce system downtime. Maintenance time was regarded as a function of degradation degree and maintenance times. A degradation degree recovery factor was used to describe the evolution process of facility degradation degree before and after maintenance. Considering the generalized time value, cost function of facility and system model was established according to the decision of maintenance and replacement based on cost-effectiveness and availability. The numerical example optimized the maintenance thresholds and calculated the replacement time and PM times of each facility. The results show that the generalized time value can accelerate the aging of facility, shorten service life, and provide a new idea for enterprise to make maintenance and replacement policy.

Key words: generalized time value; series production system; opportunistic preventive maintenance; replacement policy

收稿日期:2019-03-02

基金项目:国家自然科学基金(51475289)资助项目

作者简介:杜煜(1994-),男,湖北省黄石市人,硕士生,主要研究方向为生产系统预防性维护与更新策略.

通信作者:潘尔顺,男,教授,博士生导师,电话(Tel.):13916344551;E-mail: pes@sjtu.edu.cn.

随着现代制造类企业生产规模的不断扩大,对生产系统的稳定性和可靠性的要求越来越高,因此,良好的维护和更新策略对于生产系统的健康运行有着至关重要的作用. 串行系统是一类常见的生产加工系统(如汽车发动机 5C 件生产线),对于多工序流水生产线,机会维护策略可以有效节省因设备维护产生的停产损失,提高生产的连续性,故采用机会维护策略进行维护,并在维护策略的基础上制定系统的更新策略. 关于多设备系统的维护策略,许多学者进行了研究. 余佳迪等^[1]以带缓存的两设备串行系统为研究对象,考虑上下游设备同时故障的情况,构建了系统总成本最小的设备预防性维护模型. Lu 等^[2]针对具有中间缓冲的多设备串行系统进行了建模优化. 以上研究均考虑缓存空间,但没有考虑设备退化时引起的次品率上升的问题. 陶红玉等^[3]用 Gamma 分布描述设备的退化过程,构建了随机退化串行系统的机会维护模型,并确定了最优检测周期,但其结果是在设备退化量被定周期连续监测的条件下求得,且设备服从同一退化分布,很难与实际相符. 候文瑞等^[4]以串行生产系统为研究对象,采用机会维护策略,利用费效比决策系统内设备的维护更新行为,但在计算成本时仅考虑了系统维护时的成本,未考虑生产引发的成本,也未对维护阈值进行优化决策,且其系统可能存在可用度过低的风险. Zhou 等^[5]通过最小化系统成本,对串行系统提出了基于机会维护下的预防性维护算法. Xia 等^[6-8]提出了多特征值模型,在同时考虑成本及可用度两个目标函数前提下,决策设备最优的预防性维护周期. 通过设定维护时间窗,动态地利用混联系统中的维护机会,从而实现缩减系统成本的目的,并且提出联合生产计划以及预防性维护的调度问题,通过机会维护方式,降低了系统维护成本. 以上研究的不足之处在于,均未考虑广义时间价值的作用.

在制定设备的更新策略时,大多数生产企业仍然采用以固定的工作年龄、故障次数或维护次数为依据的传统策略,主要采用更新过程定理和平均成本率最低的方法. 贾积身等^[9]针对修理工单重休假的可修系统,比较了以工作时间和故障次数为依据的更新策略,但现实中修理工往往会轮班,不存在休假,故实际应用意义不大. Gao 等^[10]利用更新过程理论,研究了具有两类故障模式(可修和不可修)的单机系统,求出了长期运行单位成本最低的维护次数,但未考虑系统可用度的变化. Song 等^[11]研究了受限于 δ 随机冲击的退化系统最优更新策略,将系统维护时间和失效机制分别假设成几何过程和 δ 冲

击过程,以长期运行单位成本最低为目标求解最优维护次数,但仍未考虑系统可用度的变化. Wang 等^[12]研究了具有定周期检测和随机故障的可修-替换系统,结合更新过程决策使系统成本率最小的检测时间和故障次数,但假设维护行为是对设备年龄的影响,而不是对退化状态的影响. Zhao 等^[13]针对某施工企业混凝土搅拌车基于网络模型,将设备更新问题转化为图论的最短路径问题,解决了设备更新方案的选择问题,但是该方法并没有考虑不同维护策略下的改变. Chang^[14]提出了工作时间-故障类型的二元更新策略,并且对该模型进行了二次延展,进而给出了延展模型的最优预防性维护排程. 类似地,以上文献提出的更新策略均未考虑广义时间价值的作用.

设备的广义时间价值(generalized time value, GTV)指的是随着技术进步,市面上出现了性能更优、效率更高以及经济性更好的设备并被广泛采用,导致企业当前设备的重置成本降低,使用费用相对变高,所生产商品的竞争性下降,最终致使设备在因老化失效无法完成规定功能之前,用新设备代替旧设备成为必然,因此缩短了设备的服务寿命. 目前,针对设备具有广义时间价值的问题,对相关维护更新策略进行数学分析的研究尚属空白.

鉴于此,本文提出了一种全新的考虑广义时间价值的串行退化生产系统维护更新策略. 首先建立设备层维护模型,将设备的维护时间看作关于设备退化度和维护次数的函数,提出退化度恢复因子;随后根据考虑广义时间价值的设备维护成本、维护效果以及设备可用度决策设备的维护更新行为,建立系统层维护更新模型. 算例仿真对设备维护阈值进行了优化决策,并给出了系统的维护排程以及各组成设备的更新时间,证实了广义时间价值对串行退化系统内设备更新时间的影响.

1 问题描述与假设

串行生产系统如图 1 所示. 系统由 n 台设备串联而成,分别负责 n 道不同的工序. 工序之间不设置缓冲站,且负责不同工序的设备不同. 设 E_x 为负责系统第 x 道工序的设备,当设备 E_x 停机时,整个系统停机. 采用机会维护策略对系统进行维护,维护行为主要包括:预防性维护,机会预防性维护(简称机会维护),设备更新以及设备机会更新. 其中预防性维护和机会维护均为不完美维护(如除尘、润滑、更换部分零配件等),只能使设备的退化状态在一定程度上得到恢复,不能使设备恢复如初. 更新和机会更

新均为完美维护,即用新设备替换旧设备或用新部件替换旧部件,使其恢复如新.当系统运行至某一时刻 t ,设备 E_x 的退化度 F_x 第 i 次到达预防性维护阈值 D_{PM} ,系统须停机对设备 E_x 进行预防性维护或者更新.与此同时,对退化度达到机会维护阈值 D_{OM} 的其他设备进行机会维护或者机会更新. D_{PM} 和 D_{OM} 可以通过分析历史运行数据得到,也可以通过设定目标函数优化求得.研究串行生产系统在该机会维护策略下的维护排程,各组成设备的更新时间以及广义时间价值对设备更新时间的影响是本文的主要研究目标.

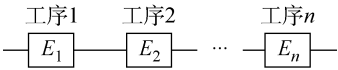


图 1 串行生产系统模型
Fig. 1 Model of series system

- 假设:
- (1) 串行系统中的所有组成设备在正常工作中的突发性故障用小修恢复,小修不改变设备的退化状态,仅恢复设备功能,且时间和费用很小,可忽略不计.
 - (2) 串行系统各工序在任意时刻的生产能力均保持平衡,除设备维修维护和更新外,系统无停机.
 - (3) 设串行系统所有组成设备的生产能力保持不变,设备生产的在制品中出现次品的概率与该设备的退化度成正比.

则有:

$$\begin{aligned} r_x(t) &\propto F_x(t) \\ \text{s. t.} \\ r_x(0) &= 0 \\ r_x(t \mid F_x(t) = 1) &= r_F \end{aligned} \tag{1} \tag{2}$$

式中: $r_x(t)$ 和 $F_x(t)$ 分别表示设备 E_x 在 t 时刻的次品率和退化度.

2 设备层维护策略建模

2.1 设备层退化模型

Gamma 过程为随机退化过程提供了有效工具,本文采用 Gamma 过程对设备的退化进行建模. Gamma 过程具有以下特性:

- (1) $X(0) = 0$;
 - (2) $\{X(t), t \geq 0\}$ 具有独立稳定的增量;
 - (3) 对于任意的 $t > 0, \Delta t > 0$,
- $$\Delta X(t) = X(t + \Delta t) - X(t) \sim Ga(\alpha \Delta t, \beta)$$
- 其中: $X(t)$ 为退化量; α 为形状参数, β 为尺度参数,满

足 $\alpha > 0, \beta > 0$; $G(\alpha \Delta t, \beta)$ 为 Gamma 分布密度函数,

$$G(x \mid \alpha \Delta t, \beta) = \frac{1}{\Gamma(\alpha \Delta t)} \beta^{\alpha \Delta t} x^{\alpha \Delta t - 1} \exp(-\beta x) I_{(0, \infty)}(x)$$

Δt 为时间差; Γ 为 Gamma 函数,且有

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty t^{\alpha-1} e^{-t} dt; I_{(0, \infty)}(x)$$

为指示函数,当 $x \in (0, \infty)$ 时, $I_{(0, \infty)}(x) = 1$, 其他情况为 0.

对于一台设备而言,当其退化量达到某一事先预设的阈值后就会失效.设设备 E_x 的退化量阈值为 d_x ,在 t 时刻的退化量为 $X_x(t)$,将设备 E_x 在 t 时刻的退化度 $F_x(t)$ 定义为 $X_x(t) > d_x$ 的概率,具体可用下式表示:

$$F_x(t) = \int_{d_x}^\infty f_{X_x(t)}(x) dx = \frac{\Gamma(\alpha_x t, d_x/\beta_x)}{\Gamma(\alpha_x t)} \tag{3}$$

式中: $f_{X_x(t)}(x) = G(x \mid \alpha t, \beta)$ 表示 t 时刻设备 E_x 退化量的概率分布密度函数.

2.2 设备层维护模型

2.2.1 维护效果 如图 2 所示,设备每次维护后的退化度应不低于设备前一次维护后的退化度,引入退化度恢复因子 ϵ ,第 i 次预防性维护对设备 E_x 的维护效果可表示为

$$F_x(t_i^*) = F_x(t_i - \epsilon T_{xi}) \tag{4}$$

式中: t_i, t_i^* 分别表示设备 E_x 第 i 次维护前和维护后的时刻; T_{xi} 表示设备 E_x 在第 i 次维护前未经任何维护行为的持续工作时间(停机时间不算); ϵ 越接近 1,表示预防性维护的效果越好.

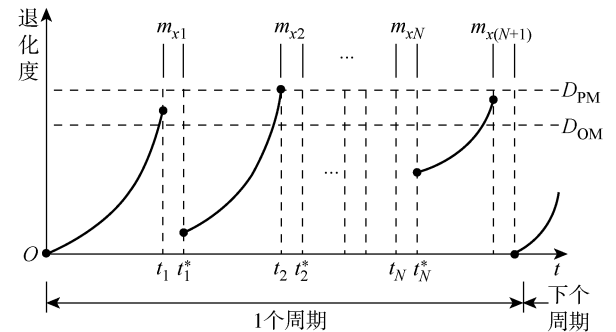


图 2 设备退化度演化模型
Fig. 2 Evolution model of degradation degree

2.2.2 维护时间 预防性维护时间的长度通常依赖于 $F(t)$,并与设备已经历的维护次数 i 有关.一般而言,相较于一台年轻设备,维护一台严重老化的设备需要消耗更多的时间.因此,设设备 E_x 第 i 次预防性维护的时长 m_{xi} 可表示为

$$m_{xi} = h \sqrt{F_x(t_i)} / b^{i-1} \tag{5}$$

式中: h, b 为维护时间参数, 且满足 $0 < b < 1, h > 1$. h, b 可以假定, 也可以通过已有数据进行函数拟合求出.

3 系统层维护更新策略建模

3.1 维护策略

假设串行系统在 t_i 时刻有设备的退化度达到 D_{PM} , 系统进入第 i 次停机维护, 引入维护因子 a_{xi} 判断设备 E_x 在第 i 次系统维护时是否需要维护或者更新:

$$a_{xi} = \begin{cases} 1, & F_x(t_i) \geq D_{OM} \\ 0, & F_x(t_i) < D_{OM} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $a_{xi} = 1$ 表示设备 E_x 需要进行维护或者更新; $a_{xi} = 0$ 表示设备 E_x 不需要维护或者更新. 再引入状态因子 ω_{xi} 判断设备 E_x 采取的维护方式:

$$\omega_{xi} = \begin{cases} 1, & \text{预防性维护} \\ 0, & \text{更新} \\ -1, & \text{停机} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\omega_{xi} = -1$ 表示设备 E_x 停机, $a_{xi} = 0$ 时必然有 $\omega_{xi} = -1$; $\omega_{xi} = 0$ 表示设备 E_x 进行更新或机会更新; $\omega_{xi} = 1$ 表示设备 E_x 进行预防性维护或机会维护. ω_{xi} 具体如何决策将在 3.3 节中详述. 结合 a_{xi} 和 ω_{xi} 可得设备 E_x 在系统第 i 次停机维护过程中需要占用的维护时长 m_{xi} 为

$$m_{xi} = a_{xi} \left[\omega_{xi} \frac{h \sqrt{F_x(t_i)}}{b^{\phi_{xi}}} + (1 - \omega_{xi}) p_x \right] \quad (8)$$

式中: p_x 为设备 E_x 所需的更新时长; ϕ_{xi} 表示系统第 i 次停机前, 设备 E_x 已进行的预防性维护次数. 经推导 ϕ_{xi} 满足关于 i 的递推数列:

$$\phi_{xi} = \left| \omega_{x(i-1)} \right| (\phi_{x(i-1)} + a_{x(i-1)}) \quad (9)$$

$$\phi_{x1} = 0$$

系统第 i 次停机维护的时间 M_i 取决于所有待维护或更新的设备中所需耗时最长的设备. 将所有设备的维护时间 m_{xi} 写成矩阵的形式 \mathbf{A}_i , 则 M_i 为矩阵 \mathbf{A}_i 中的最大值:

$$\mathbf{A}_i = [m_{1i} \quad m_{2i} \quad \cdots \quad m_{ni}] \quad (10)$$

$$M_i = \max \mathbf{A}_i \quad (11)$$

对设备 E_x 在系统第 i 次停机维护前后的退化度 $F_x(t)$ 变化进行推导.

(1) $a_{xi} = 0, \omega_{xi} = -1$, 设备 E_x 停机, 则 $F_x(t)$ 变化如下:

$$F_x(t_i^*) = F_x(t_i) = F_x(t'_{xi}) \quad (12)$$

式中: $t_i^* = t_i + M_i$ 表示系统第 i 次停机维护结束的时刻; t'_{xi} 为设备 E_x 在 t_i 时刻的等效役龄, 即设备 E_x 从退化度为 0 无维护运行到退化度为 $F_x(t_i)$ 所需要

的时间. t'_{xi} 可通过递推得到, 将在后文进行推导.

(2) $a_{xi} = 1, \omega_{xi} = 0$, 设备 E_x 更新或者机会更新, 则 $F_x(t)$ 变化如下:

$$F_x(t_i^*) = F_x(0) = 0 \quad (13)$$

(3) $a_{xi} = 1, \omega_{xi} = 1$, 设备 E_x 进行预防性维护或者机会维护, 则 $F_x(t)$ 变化如下:

$$F_x(t_i^*) = F_x(t_i - \epsilon T_{xi}) = F_x(t'_{xi} - \epsilon T_{xi}) \quad (14)$$

经推导, T_{xi} 满足关于 i 的递推数列:

$$\left. \begin{aligned} T_{xi} &= t_i - t_{i-1}^* + (1 - a_{x(i-1)}) T_{x(i-1)} \\ T_{x1} &= t_1 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

综上所述, 结合 a_{xi} 和 ω_{xi} 可得设备 E_x 在系统第 i 次停机维护结束后的某一时刻 $t (t > t_i^*)$ 的退化度为

$$F_x(t) = F_x(t - t_i^* + |\omega_{xi}| (t'_{xi} - a_{xi} \epsilon T_{xi})) \quad (16)$$

经推导, t'_{xi} 为满足关于 i 的递推数列:

$$\left. \begin{aligned} t'_{xi} &= t_i - t_{i-1}^* + \\ &\quad |\omega_{x(i-1)}| (t'_{x(i-1)} - a_{x(i-1)} \epsilon T_{x(i-1)}) \\ t'_{x1} &= t_1 \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

式(17)中的其他参数可以从系统的维护记录中获得, 则设备 E_x 在任意时刻的退化度均可求出.

3.2 维护成本

维护成本一直是生产系统维护更新策略中用来衡量策略表现的重要指标, 从不同的角度考虑, 其所包含的项目不同. 如果不考虑广义时间价值, 本文中设备 E_x 的维护成本包括预防性维护成本、更新成本、停产损失成本以及次品成本. 如果考虑广义时间价值, 维护成本除了以上提到的项目还包含: ① 因设备重置成本持续降低导致单位时间折旧费用增加的成本; ② 因技术落后导致的单位时间生产费用上升的成本; ③ 因技术落后导致系统生产的商品缺乏竞争力, 致使单位商品利润率下降的成本.

设设备 E_x 的购买成本为 v_x , 单位时间预防性维护成本为 c_{pm}^x , 更新成本为 c_p^x , 单位时间折旧费用为 c_z^x , 单位时间的生产费用为 c_o^x , 串行系统单位时间的停机损失为 L_d , 单位时间生产力为 d , 生产单个产成品的成本为 c_{pro} , 利润为 c_r . 假设技术进步是线性且连续的, 用 r_z^x 、 r_o^x 和 R 分别表示因广义时间价值导致设备 E_x 折旧费用、生产费用以及串行系统所生产单个商品利润的单位时间变化率. 考虑广义时间价值, 对设备 E_x 在系统在第 $i-1$ 次停机维护结束至第 i 次停机维护结束时间内的总维护成本 C_{Total}^{xi} 进行建模.

(1) 若设备 E_x 进行预防性维护或机会维护, 则维护成本与因 E_x 维护造成系统停机损失的成本和 C_m^{xi} 为

$$C_m^{xi} = L_d m_{xi} / n + c_{pm}^x m_{xi} \quad (18)$$

(2) 若设备 E_x 进行更新,则更新成本与因 E_x 更新造成系统停机损失的成本的和 C_m^{xi} 为

$$C_m^{xi} = L_d m_{xi} / n + c p_x + [1 - F_x(t_i)] v_x \quad (19)$$

式中: c_p^x 满足 $c_p^x = v_x - c_z^x r_z^x t_i$.

综上,系统第 i 次停机维护,设备 E_x 维护或更新成本与因 E_x 维护更新造成系统停机损失的成本和 C_m^{xi} 为

$$C_m^{xi} = a_{xi} \{ \omega_{xi} (L_d m_{xi} / n + c_{pm}^x m_{xi}) + (1 - \omega_{xi}) \times [L_d m_{xi} / n + c_p^x + (1 - F_x(t_i)) v_x] \} \quad (20)$$

(3) 设备 E_x 在 t 时刻次品率的表达式为 $r_x(t) = r_F F_x(t)$. 故系统生产出次品在设备 E_x 分摊额为

$$C_{pd}^{xi} = \frac{1}{n} \int_0^{t_i - t_{i-1}^*} d c_{pro} \times \left\{ 1 - \prod_{x=1}^n [1 - r_x(t + t_{i-1}^*)] \right\} dt \quad (21)$$

(4) 设备的折旧时间不仅包含工作时间,还包含维护时间和停机时间,故设备 E_x 因广义时间价值增加的折旧费用为

$$C_z^{xi} = c_z^x r_z^x (t_i - t_{i-1}^* + M_i) \quad (22)$$

(5) 设备 E_x 由于广义时间价值增加的生产费用为

$$C_o^{xi} = \int_0^{t_i - t_{i-1}^*} c_o^x r_o^x (t_{i-1}^* + t) dt \quad (23)$$

(6) 由于次品不能用于销售,在计算产成品利润时需要减去. 故系统所生产商品的利润下降额在设备 E_x 上的分摊额为

$$C_r^{xi} = \frac{1}{n} \int_0^{t_i - t_{i-1}^*} c_r R(t_{i-1}^* + t) d \times \left\{ 1 - \prod_{x=1}^n [1 - r_x(t + t_i)] \right\} dt \quad (24)$$

综上,考虑广义时间价值,系统第 $i-1$ 次停机维护结束至第 i 次停机维护结束期间,设备 E_x 的总维护成本 C_{xi} 可表示为

$$C_{Total}^{xi} = C_m^{xi} + C_{pd}^{xi} + C_z^{xi} + C_o^{xi} + C_r^{xi} \quad (25)$$

3.3 更新策略

对 ω_{xi} 进行决策,首先提出费效比的概念. 所谓费效比就是费用与收益的比值,本文将设备 E_x 在 t_i 时刻的费效比 K_{xi} 定义为:设备 E_x 最近的一次维护或更新结束至系统第 i 次停机维护结束期间的总维护成本 C_b^{xi} ,与系统第 i 次维护期间设备 E_x 退化度恢复水平的比值. 用公式表示为

$$K_{xi} = \frac{C_b^{xi}}{F_x(t_i) - F_x(t_i^*)} \quad (26)$$

经推导, C_b^{xi} 满足关于 i 的递推数列:

$$\left. \begin{aligned} C_b^{xi} &= (1 - a_{x(i-1)}) TC_{x(i-1)} + C_{Total}^{xi} \\ C_b^1 &= C_{Total}^1 \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

通过对比设备 E_x 进行预防性维护和更新时 K_{xi} 的大小,即可对 ω_{xi} 的取值进行决策,同时还要考虑设备 E_x 可用度的变化. 设备可用度表示设备在一段时间内工作时间与总时间的比值,由于在本文中,设备的停机是由于其他设备需要进行维护,系统无法进行生产造成的,并非出自自身原因,故这里没有将设备的停机时间计入总时间,设备 E_x 在 t_i 时刻的可用度 A_{xi} 可表示为

$$A_{xi} = \frac{t_i - \sum_{j=1}^{i-1} M_j}{t_i - \sum_{j=1}^{i-1} (1 - a_{xj}) M_j} \quad (28)$$

设 A_0 为可用度阈值,本文要求所有设备的可用度均不可低于 A_0 ,如有设备的可用度低于 A_0 则须对该设备进行更新. 假设系统第 i 次维护时,设备 E_x 进行预防性维护的费效比为 K_m^{xi} ,进行更新的费效比为 K_p^{xi} ,则设备 E_x 在系统第 i 次维护时的维护更新判据为

$$\omega_{xi} = \begin{cases} 1, & \frac{K_m^{xi}}{K_p^{xi}} < 1 \cap A_{xi} \geq A_0 \\ 0, & \frac{K_m^{xi}}{K_p^{xi}} > 1 \cup A_{xi} < A_0 \end{cases} \quad (29)$$

则依次可得到该串行生产系统各设备在系统每次维护时的维护行为,进而得到各设备的更新时间.

4 算例分析

4.1 算例建模与求解

本文以某发动机零部件串行生产系统为例,对以上维护更新策略进行数值分析. 该生产系统有负责 5 道不同工序的 5 种不同类型的设备,分别为磨床、车床、铣床、辊压机床和抛光机,该串行生产系统模型及设备编号如图 3 所示. 各设备的退化过程服从参数不同的 Gamma 分布,根据生产实际以及部分参考文献^[3-4],设置:

$$\begin{aligned} \epsilon &= 0.85, & r_F &= 50\% \\ h &= 5, & b &= 0.95 \\ p_x &= 5 \text{ d } (x = 1, 2, \dots, 5) \end{aligned}$$



图 3 串行生产系统示意图

Fig. 3 Structure of series system

$A_0 = 0.6,$

$d = 100 \text{ 件},$

$c_r = 100 \text{ 元},$

$r_o^x = 0.25\%(x = 1,2,3),$

$L_d = 10\,000$

$c_{\text{pro}} = 100 \text{ 元}$

$r_z^x = 50\%$

$R = 0.125\%$

其他维护与成本参数见表 1.

首先对设备的 D_{PM} 和 D_{OM} 进行优化决策,以串行生产系统 500 天内的所有设备的维护成本和 C_{sys} 为优化判据, C_{sys} 可表示为

$$C_{\text{sys}} = \sum_{i=1}^k \sum_{x=1}^5 c_{xi}$$

$$\text{s. t. } t_k \leqslant 500 \cap t_{k+1} > 500$$

(30)

取使得 C_{sys} 最小的阈值组合 $(D_{\text{PM}}, D_{\text{OM}})$ 作为该串行

系统维护阈值.采用 MATLAB 编程计算,通过遍历 $D_{\text{PM}} \in [0.1, 0.9], D_{\text{PM}} \in [0.1, D_{\text{PM}}]$ 内的所有组合得到使 C_{sys} 最小的阈值组合为 $D_{\text{PM}} = 0.85, D_{\text{OM}} = 0.7$, 所得的最小成本 $C_{\text{sys}} = 347.69$ 万元.

令 $D_{\text{PM}} = 0.85, D_{\text{OM}} = 0.7$, 采用 MATLAB 编程计算得到该串行生产系统在所有设备均完成一次更新前的维护工作排程如表 2 所示(由于篇幅有限,只列举了系统前 4 次停机和有设备更新时的维护排程).表中:1 代表预防性维护和机会维护;0 代表更新;空白代表停机; \cdots 代表省略的维护排程.各工序设备的首次更新时间以及更新前经历的维护次数如表 3 所示.各设备的退化度随时间的演变过程以及可用度随维护次数的演变过程如图 4 所示.

表 1 维护与成本参数

Tab.1 Parameters of maintenance and cost

设备编号	α	β	d	$v/\text{万元}$	$c_{\text{pm}}^x/\text{万元}$	$c_z^{xi}/\text{万元}$	$c_o^{xi}/\text{万元}$
1	0.15	2	10	50	0.5	0.027	0.23
2	0.25	1.65	18	60	0.55	0.033	0.2
3	0.35	1.5	26	70	0.6	0.039	0.16
4	0.47	1.38	36	80	0.65	0.045	0.13
5	0.55	1.25	44	90	0.7	0.05	0.1

表 2 预防性维护计划

Tab.2 PM schedule

维护时刻/d	维护时间/d	设备					维护时刻/d	维护时间/d	设备				
		1	2	3	4	5			1	2	3	4	5
52	4.6	1	1				472	8.0		0	1	1	1
66	4.6			1	1					...			
87	4.6					1	547	7.9	1		0	1	1
109	4.6	1	1							...			
			...				619	5				0	1
353	6.6	0	1		1					...			
			...				732	5					0

表 3 设备更新时间与维护次数

Tab.3 Replacement time and PM times

设备	更新时间/d		维护次数	
	考虑广义时间价值	不考虑广义时间价值	考虑广义时间价值	不考虑广义时间价值
1	353	383	10	12
2	472	506	14	14
3	547	575	15	17
4	619	676	16	18
5	732	805	16	18

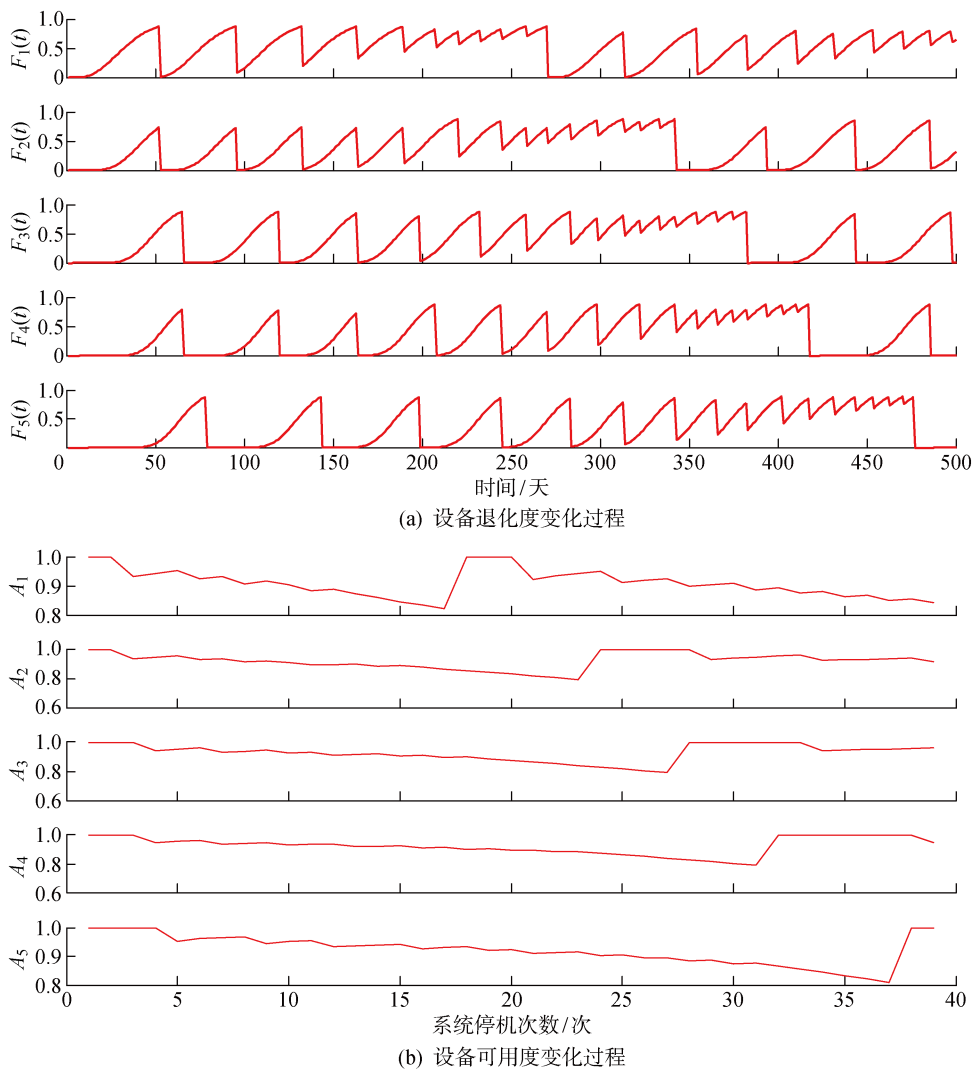


图 4 设备退化度与可用度变化过程

Fig. 4 Evolution of degradation degree and availability

4.2 结果分析

由图 4 可知:所有设备的更新原因在于 $K_m > K_p$,设备可用度均未超出限值。分析表 3 可知:负责不同工序的设备,其更新时间均相差较大,说明针对串行生产系统的更新策略应该针对单台设备具体实施,此操作比系统整体更新的策略更加准确。

由表 3 可知:不考虑广义时间价值下,各设备的更新时间均大于考虑广义时间价值下的值。进一步说明,广义时间价值会加速设备的老化,缩短设备的使用寿命。

5 结语

考虑广义时间价值,针对串行退化生产系统进行了维护更新策略的研究。提出了设备层维护模型以及系统层的维护更新模型,算例仿真优化了设备维护阈值,证实了广义时间价值会加速设备的老化,

缩短设备使用寿命的作用,为企业制定串行系统维护更新策略提供了新的尝试。然而,本文在建立生产系统模型时未考虑缓存空间的作用,故还有待进一步深入研究。

参考文献:

[1] 余佳迪,周炳海.带缓冲的串行生产系统预防性维护策略[J].上海交通大学学报,2014,48(12):1694-1699.
YU Jiadi, ZHOU Binhai. Preventive maintenance policy for series production systems with intermediate buffers [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2014, 48(12): 1694-1699.

[2] 陆志强,赵婵媛,崔维伟.串联生产系统预防性维护计划建模与优化[J].哈尔滨工程大学学报,2017,38(2):269-275.
LU Zhiqiang ZHAO Chanyuan, CUI Weiwei. Model-

- ing and optimization of preventive maintenance scheduling for series production systems [J]. **Journal of Harbin Engineering University**, 2017, 38(2): 269-275.
- [3] 陶红玉, 周炳海. 基于随机退化的串行生产系统机会维护模型[J]. **上海交通大学学报**, 2013, 47(12): 1911-1917.
- TAO Hongyu, ZHOU Binghai. Opportunistic maintenance model for series production systems based on Stochastic degradation [J]. **Journal of Shanghai Jiao Tong University**, 2013, 47(12): 1911-1917.
- [4] 侯文瑞, 蒋祖华, 金玉兰. 基于可靠度的多部件系统机会维护模型[J]. **系统工程与电子技术**, 2008, 30(9): 1805-1808.
- HOU Wenrui, JIANG Zuhua, JIN Yulan. Opportunistic preventive maintenance model of multi-components system based on reliability [J]. **Systems Engineering and Electronics**, 2008, 30(9): 1805-1808.
- [5] ZHOU X, XI L, LEE J. Opportunistic preventive maintenance scheduling for a multiunit series system based on dynamic programming [J]. **International Journal of Production Economics**, 2009, 118(2): 361-366.
- [6] XIA T, XI L, ZHOU X, *et al.* Modeling and optimizing maintenance schedule for energy systems subject to degradation [J]. **Computers & Industrial Engineering**, 2012, 63(3): 607-614.
- [7] XIA T, XI L, ZHOU X, *et al.* Dynamic maintenance decision making for series-parallel manufacturing system based on MAM-MTW methodology [J]. **European Journal of Operational Research**, 2012, 221(1): 231-240.
- [8] XIA T, JIN X, XI L, *et al.* Production-driven opportunistic maintenance for batch production based on MAM-APB scheduling [J]. **European Journal of Operational Research**, 2015, 240(3): 781-790.
- [9] 贾积身, 巴玉强, 张清叶. 修理工单重定期休假可修系统更换模型研究[J]. **数学的实践与认识**, 2014, 44(19): 207-215.
- JIA Jishen, BA Yuqiang, ZHANG Qingye. Research on replacement model for reparable system considering its repairman having single regular vacations [J]. **Mathematic in Practice and Theory**, 2014, 44(19): 207-215.
- [10] GAO Q, YUE D, ZHAO B. The ordering and replacement policy for the system with two types of failures [J]. **Journal of Systems Science & Complexity**, 2018, 31(6): 1541-1553.
- [11] ZONG S, CHAI G, ZHANG Z, *et al.* Optimal replacement policy for a deteriorating system with increasing repair times [J]. **Applied Mathematical Modelling**, 2013, 37(23): 9768-9775.
- [12] WANG G, ZHANG Y. Geometric process model for a system with inspections and preventive repair [J]. **Computers & Industrial Engineering**, 2014, 75: 13-19.
- [13] ZHAO P, LI L. Analysis based on the shortest path method of equipment replacement [C]// **IEEE 2014 26th Chinese Control And Decision Conference**, Shenyang: Control and Design, 2014: 962-965.
- [14] CHANG C C. Optimum preventive maintenance policies for systems subject to random working times, replacement, and minimal repair [J]. **Computers & Industrial Engineering**, 2014, 67, 185-194.

(本文编辑:陈晓燕)