

考虑中间库存缓冲区的设备不完美 预防维修策略研究*

刘勤明, 吕文元, 叶春明
(上海理工大学 管理学院, 上海 200093)

摘要: 针对带有库存缓冲区的设备维修问题,提出了随机故障设备的不完美预防维修策略。考虑设备随机故障率随故障次数的增多而变大的情况,基于准更新过程,建立随机故障设备的故障次数表达式。结合设备故障次数表达式,在综合考虑维修成本和库存缓冲成本的基础上,构建了设备生产成本模型,以缓冲库存量和预防维修周期为自变量,以生产成本为目标函数。获得设备的最优维修策略和最佳库存缓冲量。通过算例分析验证了模型的有效性,为生产线设计的可行性提供了依据。

关键词: 预防维修; 不完美维修; 准更新过程; 随机故障; 缓冲库存

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2018)09-2614-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2018.09.012

Study of imperfect preventive maintenance policy for equipment with intermediate buffer

Liu Qinming, Lyu Wenyan, Ye Chunming
(School of Business, University of Shanghai for Science & Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: For the problem of equipment maintenance with buffer stocks, this paper developed the imperfect preventive maintenance strategy of equipment. First, the random failure rate could become larger with the increase of the number of random failures, thus, this paper used the renewal process to obtain the number of random failures. Then, based on the number of random failures, this paper proposed the imperfect preventive maintenance model for minimizing the total production cost, included maintenance cost and inventory cost. It obtained the optimal values of two decision variables, included the size of buffer stock and the maintenance interval. Finally, it gave a numerical example to verify the validity of the proposed model.

Key words: preventive maintenance; imperfect maintenance; renewal process; random failure; buffer stock

0 引言

随着设备结构变得日益复杂,一旦设备发生故障,将给企业带来很大的损失。因此,在生产过程中,增加库存缓冲区,建立设备—库存—设备的连接方式,减少设备发生故障造成生产停止的状况。考虑库存缓冲区,制定合理的设备维修计划,可以有效降低设备故障发生率,提高生产稳定性和企业效益。

库存缓冲区和设备维修之间关系的研究具有一定的理论难度和应用价值,因此,一大批学者开展了这一方面的研究,并取得了很多成果。谭民^[1]运用全状态分析法对二级串行生产线进行了建模与分析。Meller等人^[2]建立了两级装配设备模型,利用马尔可夫链确定最优缓冲库存,通过建立成本模型确定设备的预防维修时间以及生产时间。Iravani等人^[3]通过研究包含生产单个零部件的单元设备的生产—库存系统,用马尔可夫决策模型建立维修和生产的联合决策模型。Zequeira等人^[4]针对单机系统,用生产库存模型联合决策上游设备的维护周期和最优库存缓冲。Bouslah等人^[5]研究设备故障率高、产品缺陷率高并带有中间库存缓冲的生产系统,确定出生产批量及控制策略。Yevkin等人^[6]以失效率为Weibull分布的设备为例,建立设备的更新函数,求解出维修量最小的维修方法。严正峰等人^[7]以设备状态与库存缓冲为自变量建立可靠性成

本函数,为制定装配设备最优维修方法提供了依据。周瑜等人^[8]建立了基于累积失效计数的维修效果评估模型,进而假定预防维修费用为维修效果的函数关系以反映维修深度与维修成本的映射关系。张晓红等人^[9]研究设备的视情预防维修与备件订购策略的联合优化问题。梁佩等人^[10]建立了串行生产线生产单元的可靠性模型,通过分析预防维修成本可知在各个预防性维修周期内存在一个最优值使得总维修成本最低。张斌等人^[11]研究了存在两类故障的系统可靠度及非周期不完全预防维修模型。郑睿等人^[12]建立了考虑生产过程失控、故障率和故障停时间的生产过程控制、生产计划优化和维修管理联合优化决策的模型,联合制定出生产过程检查策略、生产计划以及维修计划。综上所述,库存缓冲区对于设备维修策略的制定有着重要的影响,但是,目前研究大多假设设备的维修策略为完美维修,并且设备的随机故障发生率与故障次数没有关系。本文将同时考虑设备的维修为不完美维修和随机故障发生率相关于随机故障发生次数,制定具体的设备维修策略。

针对以上问题,综合分析了设备实际健康衰退过程,以预防维护策略修复不完美为约束条件,提出了以最小生产总成本为目标函数、以缓冲库存量和预防维修周期为自变量的带有缓冲库存的设备不完美预防维修模型。在模型中,利用准更新过程描述设备的随机故障次数,反映了设备随机故障率随故障发生次数的增大而变大。针对设备修复如新的情况,在更新周期

收稿日期: 2017-05-04; **修回日期:** 2017-06-15 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(71471116,71271138); 国家教育部人文社会科学青年基金项目(15YJCZH096); 上海理工大学国家级项目培育基金项目(16HJYPYQN02); 上海理工大学博士启动基金项目(BSQD2014038)

作者简介: 刘勤明(1984-),男,山东日照人,讲师,博士,主要研究方向为维护调度、人工智能等(lqm0531@163.com); 吕文元(1971-),男,浙江永康人,教授,博导,博士,主要研究方向为设备智能维修管理等; 叶春明(1954-),男,安徽人,教授,博导,博士,主要研究方向为生产调度。

内,设备发生随机故障则对其进行不完美事后维修,维修后的设备健康状态比维修前状态以一定的比例衰退。预防维修模型的生产总成本包括故障维修成本、库存维持成本、库存短缺成本以及预防维修成本,以缓冲库存量和维修时间间隔为决策变量,获得最优的预防维修策略,帮助企业管理层动态高效地制定考虑库存缓冲的生产设备维修优化方案。

1 模型描述

对于考虑库存缓冲的设备不完美预防维修问题,设备在每次预防维修结束后以概率 p 修复如新,反之以概率 q 修复如旧,也就是维修之后设备状态较维修前不发生改变。将两次成功的预防维修定义为一个更新周期,周期的时间间隔是随机的,取决于执行的预防维修次数。在更新周期内若设备发生随机故障则对设备进行不完美事后维修,维修后设备状态对比维修前的设备状态按固定的比例 α ($0 < \alpha < 1$) 递减。

在每个更新周期的开始阶段,假定设备以最大生产速度 α 累积缓冲库存,直至达到目标库存量 S 。该库存量 S 需要确保设备在随机故障维修或预防维修期间停机时间内,能满足下游设备的库存需求,使得生产系统持续以固定的速度 β 运行。同时,假定累积目标库存量 S 的时间足够小,在该时间段内设备不会发生随机故障。图1是预防维修策略下,更新周期内设备缓冲库存的变化轨迹(S_{i-1} 表示更新周期内第 $i-1$ 次预防维修后剩余库存量; α 表示更新周期内初始库存的生产速度)。

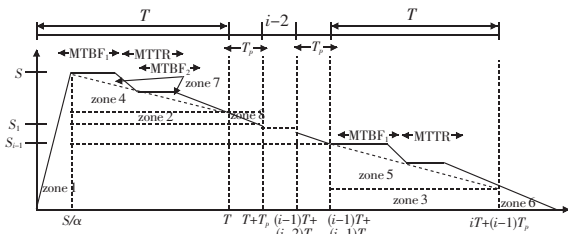


图1 更新周期内缓冲库存的变化

2 模型符号

基本符号描述如表1所示。

表1 符号描述

参数	描述	参数	描述
$f_1(t)$	设备寿命的概率密度函数	$Q(t)$	在 $[0, t]$ 内设备发生的随机故障次数
$F_1(t)$	设备寿命的概率分布函数	p	执行预防维修的成功概率
$f_2(t)$	事后维修时间的概率密度函数	q	执行预防维修的失败概率
$F_2(t)$	事后维修时间的概率分布函数	c_1	随机故障维修成本
$f_3(t)$	预防维修时间的概率密度函数	c_2	预防维修成本
$F_3(t)$	预防维修时间的概率分布函数	c_s	单位库存维持成本
$MTBF_i$	第 $i-1$ 次随机故障发生后设备的平均寿命, $MTBF_i = \frac{1}{a^{i-1}} \int_0^\infty t dF_1(\frac{t}{a^{i-1}})$	T_p	设备预防维修的平均时间, $T_p = \int_0^\infty t dF_3(t)$
$MTTR$	设备事后维修的平均时间, $MTTR = \int_0^\infty t dF_2(t)$	c_p	单位库存缺货成本
CT	更新周期内总生产成本	α	更新周期内初始库存的生产速度
S	更新周期内的缓冲库存	β	设备生产速度
T	预防维修周期	α	更新因子 ($0 < \alpha < 1$)

3 模型表达

3.1 更新周期内设备故障次数表达

在每个更新周期内,设备发生的故障次数是随机的,依据

不完美维修策略,设备发生随机故障的多少除了与设备寿命分布有关,也与预防维修成功概率 p 和更新因子 α 的大小有关。故障次数 n 会随着这些值的变化而变化。当固定设备寿命分布时,更新周期内设备随机故障次数随着 p 的减少而增大,以及随着 α 的减小而增大。本文假设设备故障率服从伽玛分布 $\text{Gamma}(\gamma, \delta)$ 。根据准更新理论^[13],得到设备在 $[0, t]$ 间隔内随机故障次数表达式:

$$Q(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \text{Gamma}(n\gamma, \delta) = \sum_{n=1}^c \text{Gamma}(n\gamma, \delta) \quad (1)$$

其中: γ 为形状参数,它影响着伽玛分布曲线的形状; δ 为尺度参数,它的取值影响着该曲线尺寸比例的大小,这两个参数都为非负数; c 表示截断值(常数),依赖于时间间隔的大小。

3.2 更新周期内单位时间生产成本模型

在更新周期内,设备总生产成本包括事后维修以及预防维修构成的总维修成本、库存持有成本、库存短缺成本。由于设备的预防维修与事后维修都是不完美维修,预防维修的次数 i ($i=1, 2, 3, \dots$) 是随机变量。更新周期内设备总生产成本都会随着 i 的变化而变化。所以对总生产成本 $CT(T, S)$ 作出如下定义:

$$CT(T, S) = \sum_{i=1}^{\infty} p q^{i-1} CT(T, S, i) \quad (2)$$

其中: $CT(T, S, i)$ 表示预防维修次数为 i 的更新周期内总生产成本。

3.2.1 更新周期内维修成本

在更新周期内,设备维修成本主要包括预防维修成本和事后维修成本。所以总维修成本如下:

$$cm = c_1 \times Q(iT) + i \times c_2 \quad (3)$$

3.2.2 更新周期内库存维持成本

构建缓冲库存是为了减少由于随机故障产生的设备停机维修而导致的对整个生产的影响。然而持有库存过多,将会为企业带来更多的持有成本。当库存变小,小于保证生产正常运作的最低量,则会产生很大的生产损失费用。因此,基于图1的更新周期内库存变化轨迹,可以得到库存持有成本的表达式:

$$\begin{aligned} cst = & c_s \left(\frac{S}{\alpha} \times \frac{S}{2} \right) + c_s \left[(T + T_p) (S_1 + \dots + S_{i-1}) - \frac{S}{\alpha} \times S_1 \right] + \\ & c_s T [S - Q(iT) \times MTTR \times \beta - (i-1) T_p \beta] + \\ & c_s \left[\frac{(T - \frac{S}{\alpha}) Q(T) \times MTTR \times \beta}{2} \right] + c_s T \frac{MTTR \times \beta \times Q((i-1)T)}{2} + \\ & c_s \left[\frac{S_{i-1} - Q_i(T) \times MTTR \times \beta}{\beta} \times \frac{S_{i-1} - Q_i(T) \times MTTR \times \beta}{2} \right] + \\ & c_s Q(iT) \left[\frac{(MTBF + MTTR) \times MTTR \times \beta}{2} - \frac{MTTR}{2} \times MTTR \right] - \\ & c_s T_p^2 \beta \frac{1}{2} (i-1) \end{aligned} \quad (4)$$

其中: $MTBF = \sum_{i=1}^{Q(iT)+1} MTBF_i$; S_i 表示第 i 次预防维修后的剩余库存量; $Q_i(T)$ 表示第 i 次预防维修周期内设备发生随机故障的次数;对任意的 S_i 有

$$S_i = S_{i-1} - Q_i(T) \times MTTR \times \beta - T_p \beta$$

因此

$$\begin{aligned} S_1 + \dots + S_{i-1} = & (i-1)S - [Q_1(T) + Q_2(T) + \dots + Q_{i-1}(T)] \times \\ & MTTR \times \beta - (i-1) T_p \beta = (i-1)S - Q((i-1)T) \times MTTR \times \beta - (i-1) T_p \beta \\ & S_{i-1} - Q_i(T) \times MTTR \times \beta = S - Q(iT) \times MTTR \times \beta - (i-1) T_p \beta \end{aligned}$$

其中: $Q(iT) \times MTTR \times \beta$ 表示更新周期内设备随机故障维修时间的平均库存消耗量。

3.2.3 更新周期内库存缺货成本

当构建的库存缓冲 S 小于设备停机维修时间内消耗的库存量 R 时,就会出现库存短缺。该更新周期内库存短缺成本的表达式如下:

$$cpt = c_p \beta \int_{\frac{S-R}{\beta}}^{\infty} (t - \frac{S-R}{\beta}) dF(t) \quad (5)$$

其中: $R = [Q(iT) \times MTTR + (i-1)T_p] \times \beta$ 。综上,得到当更新周期内预防维修次数为 i 时,其总生产成本表达式为

$$C_{total} = cm + cpt + cst \quad (6)$$

3.3 预防维修策略模型

预防维修模型要确定出对应的最优决策变量 (T, S) , 即最优的预防维修时间间隔与缓冲库存量。要得到更新周期内单位时间内总生产成本, 需要确定更新周期的时长。假定更新周期内预防维修次数为 i , 对于任意 i 值, 更新周期时长的表达式如下:

$$E(i \times T + i \times T_p) = i \times T + i \times \int_0^{\infty} t dF_3(t) \quad (7)$$

更新周期内的单位时间总生产成本:

$$CT(T, S, i) = \frac{C_{total}}{E(i \times T + i \times T_p)} \quad (8)$$

基于式(7)和(8)可得到任意 $i (i=1, 2, 3, \dots)$ 下, 维修计划目标函数为

$$\begin{aligned} & \text{minimize } Z = CT(T, S, i) \\ & \text{subject to } \begin{cases} Q(iT) \times MTTR \times \beta \leq S \leq \alpha \times i \times T \\ T > 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (9)$$

对于每个 i 值, 其对应的预防维修计划目标函数都存在一个最优解 (T^*, S^*) 以及其对应的最小单位时间生产成本 CT^* 。对于预防维修周期 T^* 和缓冲库存大小 S^* , 表达式为

$$T^* = \sum_{i=1}^{\infty} p q^{i-1} T_i^* \quad (10)$$

$$S^* = \sum_{i=1}^{\infty} p q^{i-1} S_i^* \quad (11)$$

基于式(10)和(11), 最优预防维修计划更新周期内单位时间最小生产成本 CT^* 为

$$CT^* = \sum_{i=1}^{\infty} p q^{i-1} CT_i^* \quad (12)$$

4 模型求解

不完备预防维修时间 T 和缓冲库存量 S 作为决策变量, 以单位时间内总维修成本最小为优化目标, 构建单目标不完备预防性维修模型。在模型优化求解的过程中, 首先通过设备运行的历史维修数据得到不完备预防维修费用、事后维修费用、库存持有成本、库存短缺成本、预防维修时间分布、事后维修时间分布函数以及更新因子等参数。通过枚举法令 $T=1, 2, 3, \dots$ 代入优化模型中, 分别计算出对应的最优库存以及最小的单位时间生产总成本。最后, 比较每一个 T 值对应的成本费用, 并找出单位时间内最小的总生产成本, 从而确定出最佳预防维修时间间隔以及对应的最优缓冲库存大小。其中, T 的最大值必须取得足够大, 这样能够选择到尽可能多的 T 值进行计算保证得到最优的预防维修周期, 模型的求解工作用 R 软件完成。

5 算例分析

5.1 数据准备

基于实际生产的考虑, 对模型所需要的准备数据如下:

a) 生产中设备的故障率服从如下参数的伽玛分布:

$$Ga(x) = \frac{1}{\delta^\gamma \Gamma(\gamma)} x^{\gamma-1} \exp(-\frac{x}{\delta}), x > 0$$

其中: $\Gamma(\gamma) = \int_0^{\infty} t^{\gamma-1} e^{-t} dt, \gamma=0.2, \delta=0.2$ 。该分布下设备的平均寿命时间为 0.04 月。

b) 在实际生产中, $MTTR < T_p$ 。

$f_1(t)$ 为服务伽玛分布, 形状参数和尺度参数分别为 2 和 0.3; $f_2(t)$ 为服从均值为 0.005 月的指数分布; $f_3(t)$ 为服从均值为 0.04 月的指数分布。

c) 其他参数。 $c_1 = 2500, c_2 = 100, c_s = 1, c_p = 2, \alpha = 7200, \beta = 28800, a = 0.8, p = 0.8, T \in [0, 10]$ 。

5.2 结果分析

首先需要观察在不同更新因子下, 不同预防维修周期内设备可能发生随机故障的次数变化, 来确定截断值 c 的大小。通过计算可得, 在更新因子 $a = 0.2, T = 10$ 时, 设备发生的故障次数最大值为 950, 与更新因子越小, 在相同预防维修周期内, 设备发生随机故障次数就越大, 所以本文将截断值选择为 $c = 1000$ 来进行后续计算。

通过 R 软件编程求解提出的设备不完备预防维修模型, 求解结果如表 2 所示。结果显示, 对于提出的不完备预防维修模型, 最优的策略为维修间隔期 $T = 4$ 和缓冲库存量 $S = 1302.72$ 。根据最优策略, 可以获得最小的平均生产成本 1591.489。从表 2 可知, 当 T 值过小, 或者过大都会导致生产成本增大。当 T 值过小, 设备执行预防维修次数也就增大, 增加设备维修成本以及设备停机损失成本。当 T 值过大, 设备在周期内发生随机故障的次数就越多, 这也增加了故障维修成本以及设备故障停机损失成本。

表 2 不同 T 值下最优库存及最小生产成本

T_i	S_i^*	$CT(S_i^*, T_i)$	T_i	S_i^*	$CT(S_i^*, T_i)$
0.5	1 924.29	3 062.043	5.5	1 796.83	1 729.44
1	1 373.24	2 535.976	6	1 975.02	1 798.53
1.5	1 099.94	2 172.445	6.5	2 165.22	1 880.10
2	825.91	1 896.913	7	2 399.87	1 996.47
2.5	927.10	1 720.013	7.5	2 652.46	2 126.31
3	1 046.10	1 636.137	8	2 883.94	2 241.45
3.5	1 175.47	1 602.574	8.5	3 126.48	2 364.82
4	1 302.72	1 591.489	9	3 424.69	2 526.41
4.5	1 440.42	1 606.039	9.5	3 739.26	2 698.32
5	1 610.04	1 657.789	10	4 018.54	2 845.90

为了说明提出维修策略模型的有效性, 通过 R 软件编程分别求解考虑和不考虑缓冲库存的预防维修策略模型和事后维修策略模型, 求解结果如表 3 所示。当不考虑缓冲库存时, 总的生产成本包括设备的维修成本以及停机损失成本等, 表 3 显示, 在考虑和不考虑缓冲库存的情况下, 与预防维修策略模型和事后维修策略模型相比, 文中提出的设备不完备预防维修策略的平均生产成本最小, 说明了在考虑缓冲库存情况下, 本文提出的不完备预防维修策略模型性能最优, 是有效和可行的。

表 3 三种维修策略最小平均生产成本比较结果

比较次	完美预防维修策略	完美事后维修策略	不完备预防维修策略
不考虑缓冲库存	1 716.03	2 092.18	1 606.84
考虑缓冲库存	1 649.49	1 927.31	1 591.489

同时, 考虑到不同的概率值会影响最优更新周期间隔的大小, 进而反映在库存与生产成本的变化中。对于该优化模型, 需要针对不同的预防维修成功概率 p 来观察最优预防维修策略的变化。从图 2~4 可以看出, 随着预防维修操作执行成功的概率 p 越大, 对应更新周期内最优的生产成本就越小, 最优预防维修周期就越大, 同时对应的最优缓冲库存量也就越小, 符合模型不同变量之间的现实关系。不同的企业可以根据实际生产的环境, 通过该单目标模型来获得更准确的预防维修策略。

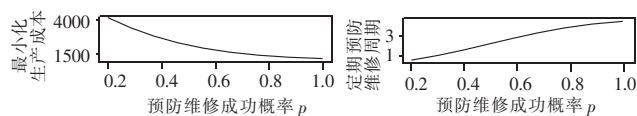


图 2 不同 p 值下最优生产成本变化

图 3 不同 p 值下预防维修周期变化

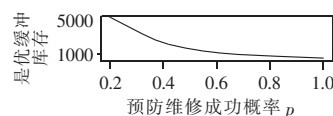


图 4 不同 p 值下最优缓冲库存变化

参数 σ 、 d 、 C 、 μ 分别为 3.2、4.78、25.0、0.6, 其平均最高故障诊断率为 98.5%, 高于调用粒子群优化支持向量机和遗传算法优化支持向量机, 以及普通杂草优化支持向量机的故障诊断率。

表3 故障诊断结果 /%

故障代码	PSO-SVM	GA-SVM	IWO-SVM	本文方法
F_0	83.3	86.7	93.3	100
F_1	80.0	86.7	93.3	93.3
F_2	90.0	90.0	96.7	96.7
F_3	93.3	93.3	96.7	96.7
F_4	96.7	96.7	100	100
F_5	100	100	100	100
F_6	83.3	86.7	93.3	96.7
F_7	93.3	93.3	100	100
F_8	100	100	100	100
F_9	90.0	90.0	96.7	96.7
F_{10}	100	100	100	100
F_{11}	93.3	93.3	96.7	100
F_{12}	96.7	96.7	100	100
平均值	92.3	93.3	97.4	98.5

5 结束语

针对 SVM 在容差模拟电路故障诊断中的问题, 由于 SVM 的诊断准确率受核函数类型及核函数参数的影响, 提出了差分进化入侵杂草算法优化多核 SVM 的算法, 通过 DE-IWO 优化多核 SVM 的四个主要参数, 以提高故障诊断率。通过小波包变换提取信号样本以重构模拟电路时域信号。实际运算结果表明, 本文提出的 SVM 模型的故障诊断率更高, 能更准确定位参变故障。

参考文献:

- [1] Hu Yunyan, Peng Minfang, Tian Chenglai, *et al.* Analog circuit fault diagnosis using multi-wavelet transform and SVM [C]//Proc of the 3rd International Conference on Digital Manufacturing and Automation. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2012: 214-217.
- [2] Grzechca D, Czaczkotka S. Faults classification in analog electronic circuits with use of the SVM algorithm [C]//Proc of European Conference on Circuit Theory and Design. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2009: 659-662.
- [3] 赵德赞, 邢军, 王智森. 基于嵌入式系统的 BP 神经网络及其在模拟电路故障诊断中的应用 [J]. 大连工业大学学报, 2016, 35(1): 57-61.
- [4] Kuczyński S A. Parametric faults detection in analog circuits using polynomial coefficients in NN learning [C]//Proc of International Conference on Signals and Electronic Systems. 2010.
- [5] Zhao Guohui, Zhou Longfu, Yang Yatao. Soft fault diagnosis in analog circuit based on fuzzy and direction vector [C]//Proc of IEEE Circuits and Systems International Conference on Testing and Diagnosis. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2009: 1-4.
- [6] Song Guoming, Wang Houjun, Liu Hong, *et al.* Analog circuit fault diagnosis using lifting wavelet transform and SVM [J]. Journal of Electronic Measurement & Instrument, 2010, 24(1): 17-22.
- [7] 张朝龙, 何怡刚, 袁莉芬, 等. 基于 GMKL-SVM 的模拟电路故障诊断方法 [J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(9): 1989-1995.
- [8] Vapnik V N, Golowich S, Smola A. Support vector method for function approximation, regression estimation, and signal processing [C]//Advances in Neural Information Processing Systems. 1997: 281-287.
- [9] Mehrabian A R, Yousefi-Koma A. A novel technique for optimal placement of piezoelectric actuators on smart structures [J]. Journal of the Franklin Institute, 2011, 348(1): 12-23.
- [10] 肖辉辉, 段艳明. 基于 DE 算法改进的蝙蝠算法的研究及应用 [J]. 计算机仿真, 2014, 31(1): 272-277.
- [11] 邱傲. 基于入侵杂草算法的改进研究及其应用 [D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2016.
- [12] 刘遼. 基于野草算法的文本特征选择研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2013.
- [13] 左旭坤, 苏守宝. 多子群入侵杂草优化算法研究及应用 [J]. 计算机工程, 2014, 40(2): 184-188.
- [14] 陈欢, 周永权, 赵光伟. 基于混沌序列的多种群入侵杂草算法 [J]. 计算机应用, 2012, 32(7): 1958-1961.
- [15] 刘波, 王凌, 金以慧. 差分进化算法研究进展 [J]. 控制与决策, 2007, 22(7): 721-729.
- [16] 丁晓阳, 李嵩华. 一种改进的差分进化算法 [J]. 陕西师范大学学报: 自然科学版, 2016, 44(1): 1-6.
- [17] 张大斌, 周志刚, 叶佳, 等. 基于随机扩散搜索的协同差分进化算法 [J]. 计算机工程, 2014, 40(7): 183-188.

(上接第 2616 页)

6 结束语

本文针对带有库存缓冲区的生产设备构建一个预防维修模型。考虑实际维修能力的约束, 模型考虑了不完美预防维修策略和不完美事后维修策略, 假设设备的预防维修时间和事后维修时间服从随机分布。通过更新理论, 研究如何针对不完美维修的设备来计算其在更新周期内的随机故障次数, 基于故障次数计算出每个更新周期内单位时间生产成本的表达式, 生产成本包括总的维修成本、库存持有成本和库存短缺成本。以缓冲库存量和维修间隔期为目标函数。最后, 基于最小化生产总成本为目标函数构建出了单目标库存生产下设备不完美维修策略的数学模型, 并给出了该模型的最优化求解思路, 通过一个算例验证了模型的有效性。

参考文献:

- [1] 谭民. CIMS 串行生产线可靠性建模与分析的研究 [J]. 控制与决策, 1993, 8(6): 401-408.
- [2] Meller R D, Kim D S. The impact of preventive maintenance on system cost and buffer size [J]. European Journal of Operational Research, 1996, 95(3): 577-591.
- [3] Iravani M R, Duenyas I. Integrated maintenance and production control of a deteriorating production system [J]. IIE Transactions, 2002, 34(5): 423-435.
- [4] Zequeira R I, Prida B, Valdes J E. Optimal buffer inventory and preventive maintenance for an imperfect production process [J]. International Journal of Production Research, 2004, 42(5): 959-974.
- [5] Bouslah B, Gharbi A, Pellerin R. Joint optimal lot sizing and production control policy in an unreliable and imperfect manufacturing system [J]. International Journal of Production Economics, 2013, 144(1): 143-156.
- [6] Yevkin O, Krivtsov V. Comparative analysis of optimal maintenance policies under general repair with underlying Weibull distributions [J]. IEEE Trans on Reliability, 2013, 62(1): 82-91.
- [7] 严正峰, 刘猛. 带有中间缓冲区的生产系统设备维修策略研究 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2015(9): 81-85.
- [8] 周瑜, 寇纲, 尔古打机. 考虑维修效果与计划水平的预防维修决策优化 [J]. 系统工程学报, 2015, 30(2): 281-288.
- [9] 张晓红, 曾建潮. 设备视情预防维修与备件订购策略的联合优化 [J]. 机械工程学报, 2015, 51(11): 150-158.
- [10] 梁佩, 王少华, 董心洁, 等. 串行生产线预防维修可靠性研究 [J]. 机械设计与制造, 2015(8): 249-252.
- [11] 张斌, 张岚. 基于退化和随机冲击的非周期不完全预防维修模型 [J]. 统计与决策, 2016(14): 77-80.
- [12] 郑睿, 吕文元. 考虑故障停机的生产控制与维修计划联合决策模型 [J]. 中国管理科学, 2016, 24(8): 116-122.
- [13] Wang Hongzhou, Pham H. A quasi-renewal process and its applications in imperfect maintenance [J]. International Journal of System Science, 1996, 27(10): 1055-1062.