

# 可用度约束条件下的设备不完美预防维修策略

林 数, 吕文元

(上海理工大学, 上海 200093)

**摘要:**针对2M1B生产系统,基于设备实际维修情况,提出了故障设备不完美预防维修策略。首先,考虑设备随时间不断劣化的情况,基于准更新过程,建立了生产周期内设备随机故障次数的表达式,计算了设备维修总费用。其次,通过分析缓冲区内库存的变化轨迹,以生产周期内设备随机故障次数为基础,计算了缓冲区库存费用,综合设备维修费用和缓冲区库存费用,构建了周期内生产总成本模型。以满足系统最低要求的可用度水平为约束条件,以预防维修周期和缓冲区库存量为决策变量,以生产周期内单位时间总成本为目标函数,通过离散迭代算法获得最优预防维修周期和此周期下的最佳缓冲区库存量。最后,通过数值分析验证了模型的有效性,为制定最佳维修策略提供了有效依据。

**关键词:**不完美预防维修;准更新过程;随机故障;可用度;缓冲库存

中图分类号:TB114

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2020)01-0160-07

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2020.01.029

## Imperfect Equipment Prevention Maintenance Strategy under Availability Constraints

LIN Shu, LYU Wen-yuan

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

**Abstract:** For the 2M1B production system, based on the actual maintenance of the equipment, a fault prevention equipment maintenance strategy is proposed. Firstly, considering the continuous deterioration of equipment over time, we establish an expression of the number of random failures of equipment in the production cycle based on the renewal process and calculate the total cost of equipment maintenance. Secondly, by analyzing the change trajectory of inventory in the buffer, based on the number of random failures of equipment in the production cycle, the buffer inventory cost, integrated equipment maintenance cost and buffer inventory cost are calculated, and the total production cost model is built. Taking the availability level that meets the minimum requirements of the system as the constraint condition, taking the preventive maintenance cycle and buffer inventory as the decision variables and the total cost per unit time within the production cycle as the objective function, the optimal preventive maintenance cycle and the optimal buffer inventory under this cycle are obtained through the discrete iterative algorithm. Finally, the validity of the model is verified by numerical analysis, which provides an effective basis for developing the optimal maintenance strategy.

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

### 0 引言

为了保证生产的连续性,即在两个设备之间加入一个库存缓冲区,即2M1B生产系统,如图1所示。缓冲区是应对因设备故障而导致的生产中断,这种设备—缓冲区—设备的生产系统可大大降低因设备随机故障导致的生产停滞。制定合理、有效的设备维修计划,设置缓冲区的大小,能有效提高生产系统的稳定性。



图1 2M1B生产系统的基本构成

2M1B生产系统能够有效地应对因设备随机故障导致的生产线的中断,具有一定的应用价值。因此,许多学者在这一方面展开了深入的研究。如Wijngaard提出在两机设备之间加入缓冲区,将设备状态分为 $m+1$ 个阶段,第0个阶段表示设备为全新的状态,第

收稿日期:2019-01-15

修回日期:2019-05-21

网络出版时间:2019-09-24

基金项目:国家自然科学基金(71471116);上海市浦江人才计划资助(14PJJC077)

作者简介:林数(1992-),男,硕士研究生,研究方向为数据挖掘、设备智能维修管理;吕文元,教授,博士,博导,研究方向为设备智能维修管理。

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20190924.1535.032.html>

$m$  个阶段表示设备发生随机故障需要进行维修的状态,并运用随机模型对设备的可靠性进行研究,评估了缓冲区库存对生产系统产量的作用及影响<sup>[1]</sup>。van der Duyn Schouten 等提出一个新的模型,即上游设备生产原材料或半成品输送给下游设备,两个设备之间设有一个缓冲区库存,其作用是应对上游设备发生随机故障带来的生产停滞,缓冲区最大库存水平有限,该模型运用马尔可夫决策理论来确定最优的维护策略<sup>[2]</sup>。Salameh 和 Ghattas 针对带缓冲区的二级生产系统进行定期的预防性维修,建立的模型中包括库存的持有成本和缺货成本,通过求解模型得到了系统的最优预防维修周期以及最佳的缓冲区库存量<sup>[3]</sup>。Chelbi 等假设设备速率固定和设备故障完美维护的前提下,建立了故障设备的等周期预防性维护策略,同时决策设备之间缓冲区的大小<sup>[4]</sup>。陆志强等考虑带缓冲区的可修复设备,假设预防性维护行为是完美维护,设备维修后将回到最初全新的状态,建立以单位时间总维修成本最小和系统设备可用度最大的多目标预防性维护决策模型,运用模糊加权理论求解出系统最优预防性维护周期以及最佳缓冲区库存量<sup>[5]</sup>。周炳海和高忠顺针对带缓冲区的生产系统,以预防维护时刻点作为随机变量建立周期内期望成本模型,通过构造算法求解出系统最优预防性维护时刻点<sup>[6]</sup>。Liao 通过假设设备故障完美维修,研究了不同的维护条件对于系统运作成本的影响,同时建立了相应的成本模型来确定最优维护周期<sup>[7]</sup>。余佳迪和周炳海针对带缓冲区的串行生产系统,同时考虑在上下游设备故障的情况下建立周期内预防性维护成本模型,在保证系统产能不下降的前提下以周期内总维护成本最小化为目标,通过迭代演化算法求解出最优预防性维护周期和最优缓冲量<sup>[8]</sup>。Dahane 等针对两机系统的生产计划产量,同时考虑了设备的维护计划,提出了最大缓冲建模方法,但没有考虑缺货成本<sup>[9]</sup>。Zequeira 等考虑系统中设备随时间的劣化所产品质量缺陷和缓冲区库存的缺货成本问题,建立了设备维护周期以及最佳缓冲区库存量联合优化模型<sup>[10]</sup>。Nursanti 等针对批量生产系统进行不完美预防性维修,同时满足系统可靠性的前提下得到了系统最佳预防维修间隔期<sup>[11]</sup>。Mabrouk 等针对租赁设备运用不完美维修的  $(p, q)$  法则来建立预防周期内的总成本模型,最后获得最优维修周期策略<sup>[12]</sup>。

目前研究大多数是假设对设备进行完美维修,并没有考虑系统可用度的要求,文中将同时考虑对故障设备进行不完美维修和满足系统最低可用度水平下,制定具体的维修策略。

## 1 模型描述

文中研究的对象是 2M1B 生产系统,如图 1 所示,上游设备为下游设备提供原材料或半成品,两设备之间有一个库存缓冲区,防止因上游设备故障而导致的生产线停滞。上游设备以最大的生产速率  $U_{\max}$  来积累库存  $S$ ,直至达到目标库存量,达到目标库存量后上游设备的生产速率恢复至  $d$ 。该目标库存量是为了应对上游设备进行预防维修或故障维修时满足下游设备的正常需求,下游设备始终以速率  $d$  从缓冲区获取半成品或原材料,从而保证整条生产线持续运行。设备在每次预防维修结束后,都以概率  $p$  修复如新,以概率  $q$  修复如旧,即维修后设备以  $p$  的概率恢复至全新状态,以  $q$  的概率恢复至故障前的状态。文中将相邻两次成功预防维修之间的时间间隔定义为一个生产周期。系统内设备若发生随机故障则对设备进行事后维修,维修后设备状态比维修前的设备以固定的比例  $a$  ( $0 < a < 1$ ) 递减。

为了更清晰地描述所研究的问题,结合实际生产情况,做出如下基本假设:

- (1) 设备  $M_2$  不会发生故障,其一直处于正常运行生产状态;
- (2) 设备  $M_1$  发生故障后可以马上进行事后维修,因维修需要的等待时间忽略不计;
- (3) 在建立缓冲区目标库存量之前设备不会发生故障,且维修后设备可以立刻进行生产;
- (4) 允许设备有足够的生产能力,以速度  $U_{\max}$  快速生产出大小为  $S$  的缓冲库存;
- (5) 设备寿命、预防性维修和故障维修的概率密度函数是已知的,且执行维护操作所需的所有资源都可以在适当的时间获得;
- (6) 该系统是一个随着时间不断劣化的系统,设备的故障次数越多,设备的故障率就越高。

针对文中构建的不完美预防性维修模型,给出如下符号定义,如表 1 所示。

表 1 符号定义

参数	描述	参数	描述
$f_1(t)$	设备寿命的概率密度函数	$p$	执行预防维修成功的概率
$F_1(t)$	设备寿命的概率分布函数	$q$	执行预防维修失败的概率
$f_2(t)$	事后维修时间的概率密度函数	$c_1$	故障维修成本

续表 1

参数	描述	参数	描述
$F_2(t)$	事后维修时间的概率分布函数	$c_2$	预防维修成本
$f_3(t)$	预防维修时间的概率密度函数	$c_3$	单位库存持有成本
$F_3(t)$	预防维修时间的概率分布函数	$c_4$	单位库存缺货成本
$R(t)$	设备的可靠性函数	$T_p$	预防维修的平均时间
$MTBF_i$	第 $i-1$ 次随机故障后设备的平均寿命	$U_{max}$	建立初始库存时上游设备的生产速度
MTTR	设备事后维修的平均时间	$d$	下游设备的生产速度
CT	周期内总生产成本	$a$	更新因子
$S$	缓冲区库存量	$C_m$	周期内维修成本
$T$	预防维修周期	$C_s$	周期内缓冲区库存持有成本
$Q(t)$	在 $[0, t]$ 内设备发生的随机故障次数	$C_p$	周期内缓冲区库存缺货成本

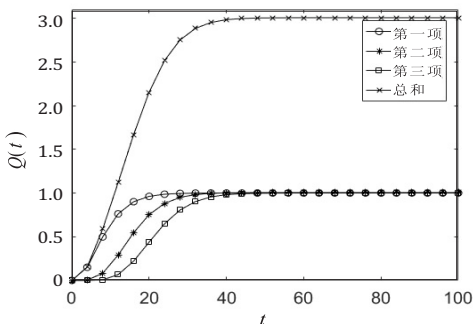
## 2 模型构建

### 2.1 设备故障次数的计算

在系统生产周期内设备发生随机故障次数是不确定的,由设备维修理论可知,系统内设备发生随机故障的次数不仅与故障设备的寿命分布规律和更新因子  $a$  有关,而且和设备预防维修成功概率  $p$  有关。系统内设备随机故障次数会根据  $a$  和  $p$  的改变而改变<sup>[13-14]</sup>。伽玛分布在设备故障规律方面具有很强的普遍性和适用性,所以经常被用于生产设备的故障率表达。伽玛分布的故障率函数为:

$$f(t) = \frac{t^{\gamma-1} \exp(-\frac{t}{\delta})}{\delta^\gamma \Gamma(\gamma)} \quad (1)$$

因此假设系统内设备故障率服从伽玛分布  $\text{Gamma}(\gamma, \delta)$ ,根据准更新过程理论<sup>[15]</sup>,设备在时间间隔  $[0, t]$  内随机故障次数的表达式为:



$$Q(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \text{Gamma}(n\gamma, \delta) = \sum_{n=1}^c \text{Gamma}(n\gamma, \delta) \quad (2)$$

其中,参数  $\gamma$  为形状参数,影响伽玛分布曲线的形状; $\delta$  为尺度参数,影响伽玛分布曲线的比例尺寸的大小; $c$  为截断值(常数)。

首先观察式 2 可知,它是在无限实数范围内,系统设备故障概率分布函数的和,其中式 2 的每一项表示可修复设备在  $[0, t]$  间隔内,对设备进行  $n$  次不完美维修的概率。所以明显可得,当  $n$  越大时,设备概率分布函数值就越小;当  $n$  趋于无穷时,设备概率分布函数值趋向零。很显然这个截断值  $c$  与系统生产周期的时间间隔大小有关。为了验证假设的合理性,通过一个数值模拟来说明。假设设备发生随机故障的时间服从  $\gamma = 3, \delta = 3$  的伽玛分布,更新因子  $a = 0.8$ ,图 2 所示的是当  $c = 3$  和 5 时,  $Q(t)$  中的每个求和项的分布函数曲线和总和  $Q(t)$  分布函数的曲线。

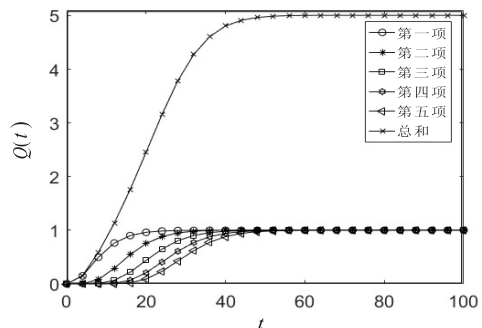


图 2 截断值  $c = 3$  和 5 时不同时刻  $t$  下设备随机故障次数

从图 2 左图可知,当系统预防维修周期  $t$  在  $[0, 40]$  时,式 2 可以满足条件的截断值  $c = 3$ 。由此可知,在一定条件下对于截断值  $c$  的变化趋势有一定规律,即系统预防维修周期  $t$  与截断值  $c$  成正比关系。若  $t$  增大则  $c$  增大,反之若  $t$  减小则  $c$  减小。如图 2 右图所示,当系统预防维修周期  $t$  小于等于 50 时,式 2 可以满足条件的截断值  $c = 5$ 。

### 2.2 维修成本费用

系统周期内的设备维修成本由设备故障维修成本和设备预防维修成本组成。关于设备维修成本的建模问题,主要的难点是对于周期内设备的随机故障次数的表达,根据准更新过程理论对设备随机故障次数进行了描述与分析,因此可得周期内维修总成本为:

$$C_m = c_1 Q(iT) + ic_2 \quad (3)$$

其中,  $Q(iT)$  表示在  $i$  个预防维修周期内设备的随机故障次数,  $i$  为预防维修的次数。

### 2.3 缓冲区库存费用

构建缓冲区的目的是防止上游设备的随机故障对整个系统产能的影响,缓冲区中放置的是原材料或者在制品,因此缓冲区内库存过多,会增加企业的库存持有成本,不利于资金的流动;缓冲区库存过少时,则不能保证系统正常生产的最低库存量,一旦缺货会造成严重的生产损失。因此构建合理的缓冲库存量对于企业也至关重要。图3是周期内缓冲区库存的变化轨迹。

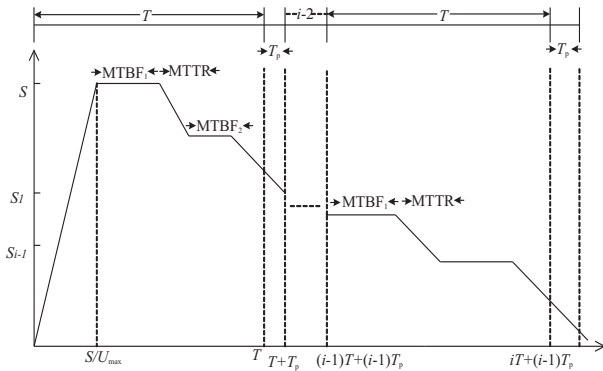


图3 周期内缓冲库存的变化轨迹

系统缓冲区成本包括缓冲区内半成品的持有成本以及当对上游设备进行预防维护时,下游设备不断从缓冲区内获取半成品,预防维修时间大于缓冲库存供给时间导致的缺货成本。若上游设备的预防维修时间小于缓冲库存的供给时间,此时的缓冲区成本即为库存的持有成本。在模型中假定单位时间内每单位库存的持有成本  $c_3$  是固定已知的。

所以,通过图3周期内库存变化轨迹可以得到缓冲区库存持有成本  $C_s$  的表达式为:

$$\begin{aligned}
 C_s = & c_3 \left( \frac{S}{U_{\max}} \cdot \frac{S}{2} \right) + c_3 [ (T + T_p) (S_1 + \dots + S_i) - \\
 & \frac{S}{U_{\max}} \cdot S_1 ] + c_3 \cdot T [ S - Q(iT) \cdot \text{MTTR} \cdot d - (i-1)T_p \cdot \\
 & d ] + c_3 \left[ \frac{(T - S/U_{\max}) \cdot Q(T) \cdot \text{MTTR} \cdot d}{2} \right] + \\
 & c_3 \cdot T \left( \frac{Q((i-1)T) \cdot \text{MTTR} \cdot d}{2} \right) + \\
 & c_3 \left[ \frac{S_{i-1} - Q_i(T) \cdot \text{MTTR} \cdot d}{d} \cdot \frac{S_{i-1} - Q_i(T) \cdot \text{MTTR} \cdot d}{2} \right] + \\
 & c_3 \cdot Q(iT) \left[ \frac{(\text{MTBF} + \text{MTTR}) \text{MTTR} \cdot d}{2} - \frac{\text{MTTR}}{2} \cdot \right. \\
 & \left. \text{MTTR} \right] - c_3 \cdot T_p^2 \cdot d \cdot \frac{(i-1)}{2} \quad (4)
 \end{aligned}$$

其中,  $S - Q(T) \cdot \text{MTTR} \cdot d$  表示设备在周期  $T$  内消耗的库存量;  $S_i$  表示经过  $i$  次预防维修结束后的剩余库存量;  $Q(iT)$  表示第  $i$  次预防维修周期内设备发

生随机故障的次数;  $\text{MTBF} = \sum_{i=1}^{Q(T)+1} \text{MTBF}_i$ ,  $\text{MTBF}_i$  表示第  $i-1$  次随机故障发生后设备的平均寿命,所以  $\text{MTBF}_i$  为:

$$\text{MTBF}_i = \frac{1}{a^{i-1}} \int_0^\infty t dF_2 \left( \frac{t}{a^{i-1}} \right)$$

对任意的  $S_i$  有:

$$S_i = S_{i-1} - Q_i(T) \cdot \text{MTTR} \cdot d - T_p \cdot d$$

因此可以推出:

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

其中,  $Q(iT) \cdot \text{MTTR} \cdot d$  表示系统周期内设备随机故障维修时间的平均库存消耗量。

当构建的缓冲区库存小于设备停机维修时间内下游设备消耗的库存量时,则会造成库存缺货,从而导致生产线中断,造成严重的生产损失;企业追求的生产连续性是保证产品产量的基础,一旦生产线中断,则会影响产品的交货期,从而对企业造成不可忽略的影响。在周期内缓冲区库存缺货成本  $C_p$  可表示为:

$$C_p = c_4 \cdot d \cdot \int_{(S-R)/d}^\infty \left( t - \frac{S-R}{d} \right) dF_3(t) \quad (5)$$

其中,  $R = S - Q(iT) \cdot \text{MTTR} \cdot d + (i-1)T_p \cdot d$  表示系统周期内缓冲区剩余的库存量。

### 2.4 系统可用度

文中提出的不完备预防维修策略模型要求系统可用度满足系统最低可用度水平,基于可用度的定义,将设备可用度表达如下:

$$\text{SA}(T) = 1 - \frac{L(T)}{P(T)} \quad (6)$$

其中,  $P(T)$  表示一个生产周期,见式7;  $L(T)$  表示一个周期内设备停机的总平均时间,见式8。

$$P(T) = \sum_{i=1}^\infty pq^{i-1} (T + T_p) \quad (7)$$

$$L(T) = \sum_{i=1}^\infty pq^{i-1} (iT_p + T_c Q(iT)) \quad (8)$$

文中提出的不完备预防维修模型的系统中设备只有两种状态:正常运行和停机。所以系统周期内的设备停机时间是设备故障维修时间与设备预防维修时间之和,即有:

$$\text{SA}(T) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^\infty pq^{i-1} (iT_p + T_c Q(iT))}{\sum_{i=1}^\infty pq^{i-1} (T + T_p)} \quad (9)$$

其中有:

$$\sum_{i=1}^{\infty} q^{i-1} \cdot i = \left(\frac{1}{1-q}\right)^2 = \frac{1}{p^2} \quad (10)$$

将式 10 带入式 9 可得：

$$SA(T) = 1 - \frac{T_p + p^2 \cdot T_c [Q_1(T) + \sum_{i=2}^{\infty} q^{i-1} Q(iT)]}{T + T_p} \quad (11)$$

其中,  $Q_1(T)$  表示系统周期内第一个定期预防性维修间隔期间  $T$  内, 系统中设备发生随机故障的次数;  $Q(iT)$  表示在  $i$  个定期预防维修时间间隔期间  $iT$  内, 系统中设备发生随机故障的总次数。

### 2.5 预防维修策略模型

以 2M1B 生产系统为研究对象, 实际生产维修中, 对设备的维修不可能达到完美维修的理想状态, 即“修复如新”。因此文中从实际生产角度出发, 对设备进行不完美维修。首先利用准更新过程对周期内设备故障次数进行表达; 其次分析了缓冲区库存对总成本的影响, 建立了设备不完美预防维修策略模型, 该模型包括故障维修成本、预防维修成本、缓冲区库存持有成本以及缺货成本; 然后对系统可用度进行了描述, 以满足系统最低要求的可用度水平  $A_0$  为约束条件, 建立了可用度约束条件下设备不完美预防维修策略模型, 即:

$$\min CT = \frac{C_m + C_s + C_p}{iT + iT_p} \quad (12)$$

$$s. t \begin{cases} SA(T) \geq A_0 \\ Q(iT) \cdot MTTR \cdot d \leq S \leq U_{max} \cdot i \cdot T \\ T > 0 \end{cases}$$

由式 12 可知, 目标函数中含有自变量缓冲区库存  $S$  和预防维修周期  $T$ , 在单位时间维修总成本最小前提下, 同时满足系统最低要求的可用度水平, 求得最佳缓冲区库存  $S$  和最优预防维修周期  $T$ 。

### 3 模型求解

文中提出的可用度约束条件下设备不完美预防维修策略模型, 是以预防维修周期及缓冲区库存量为自变量, 以单位时间内总成本最小为优化目标。主要思想是求出当满足系统最低可用度  $A_0$  时的时间间隔  $[T_1, T_2]$ , 在此时间间隔内把  $T$  代入目标函数, 可以计算出最佳的缓冲区库存量和周期内单位时间最小生产总成本, 然后比较每一个预防维修周期下对应的最小生产总成本, 找出最小值, 从而确定最佳缓冲区库存和最优预防维修周期。模型的求解工作用 R 软件编程实现。算法流程如图 4 所示。

### 4 算例分析

结合生产中对设备维修情况的实际因素, 模型所

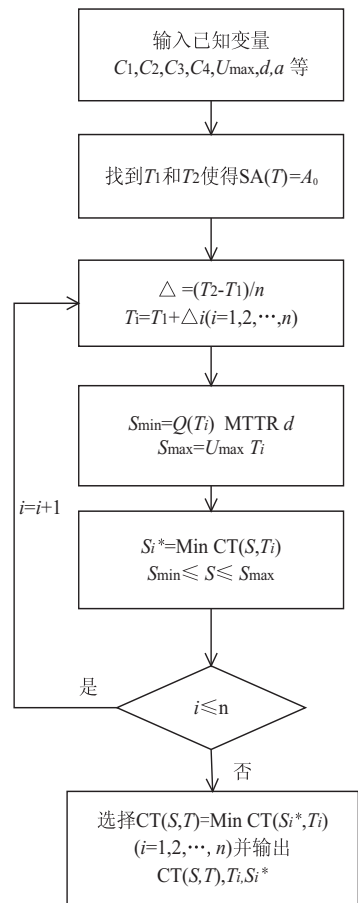


图 4 算法流程

需要的数据如下：

(1) 因为伽玛分布能够反映设备故障率的变化规律, 且适应性比较强, 所以这里假设系统中设备的故障率服从如下参数的伽玛分布:

$$f(t) = \frac{t^{\gamma-1} \exp(-\frac{t}{\delta})}{\delta^{\gamma} \Gamma(\gamma)}$$

其中,  $\Gamma(\gamma) = \int_0^{\infty} t^{\gamma-1} e^{-t} dt$ 。

(2) 在实际设备维修中, 由于预防性维修周期远远大于故障维修时间, 所以假设:

$f_1(t)$  服从伽玛分布, 其中形状参数和尺度参数分别为 2 和 2;

$f_2(t)$  为服从均值为 0.005 天的指数分布;

$f_3(t)$  为服从均值为 0.04 天的指数分布。

(3)  $c_1 = 250$  元/次,  $c_2 = 100$  元/次,  $c_3 = 1$  个/天,  $c_4 = 2$  个/天,  $U_{max} = 7200$  个/天,  $d = 28800$  个/天。

(4) 不完美预防维修的概率  $p = 0.8$ , 更新因子  $a = 0.8$ 。

(5) 要求系统最低可用度水平:  $A_0 = 94.8\%$ 。

要确定设备在周期内的故障次数, 首先要确定截断值  $c$ , 接下来确定在不同的  $T$  值、不同  $p$  和不同  $a$  下对应的截断值  $c$  的大小。通过 R 软件编程求解的结果

如表 2 所示。

表 2 不同更新因子下,设备在不同预防维修周期下的随机故障次数

对应周期随机故障次数	更新因子 $a$ 和预防维修成功率 $p$ 的值							
	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	
1	117.3	45.3	19.1	7.4	2.9	1.6	1.2	
2	246.1	104.4	52.2	25.7	10.9	4.1	2.5	
3	373.1	162.6	86.1	47.2	23.3	8.9	3.9	
4	499.2	220.1	119.9	69.4	37.7	16.1	5.7	
5	624.7	276.8	153.2	92.1	53.1	25.1	8.3	
6	749.9	332.9	185.9	114.7	69.3	35.1	11.9	
7	875.0	388.7	218.0	136.8	86.1	45.8	16.5	
8	1 000.0	444.4	249.7	158.2	103.1	57.5	22.1	
9	1 125.0	500.0	281.1	179.1	119.6	70.3	28.3	
10	1 250.0	555.6	312.5	199.6	135.6	83.9	34.9	
11	1 375.0	611.1	343.7	219.8	150.8	97.7	41.7	
12	1 500.0	666.7	375.0	240.0	165.6	111.8	49.1	

由表 2 可知,更新因子  $a$  越小,在相同预防维修周期内设备在周期内发生随机故障次数越多。同理,当预防维修成功率  $p$  越小时,系统中设备在周期内的故障次数也越多,同时从表中可知,周期内设备随机故障次数最大为 1 500,所以截断值取 1 500。

在确定截断值后,根据不同的预防维修周期  $T$  值、

$p$  和  $a$ ,通过 R 语言编程可绘制设备的随机故障次数坐标图,如图 5 所示。从图 5 可以看出,随着设备预防维修周期的增加,设备在周期内的随机故障次数也随之增加;随着更新因子  $a$  和预防维修成功率  $p$  的不断减小,设备在周期内的随机故障次数也随之增加;此规律也与不完备预防维修模型的假定相符合。

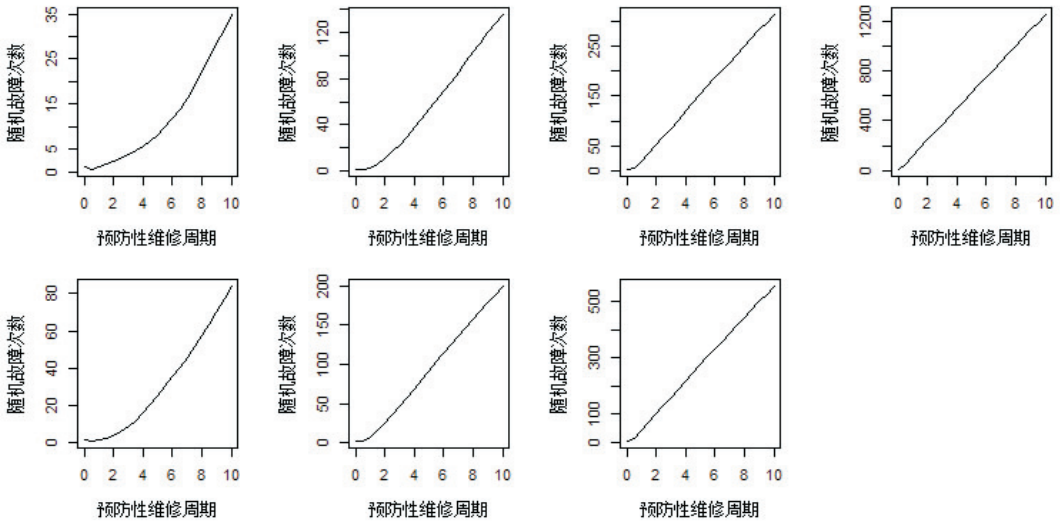


图 5 不同  $T$  值、 $p$  和  $a$  下设备随机故障次数变化规律

由 R 软件编程可得,在满足系统 94.8% 最低可用度要求的预防维修周期  $T$  的区间为  $[5, 8]$ ,如图 6 所示。所以接下来在此区间内寻找单位时间内总维修成本最小的最优预防维修周期  $T$  与最佳缓冲区库存量  $S$ 。表 3 为在满足系统 94.8% 可用度要求下的预防维修周期区间内对应的具体计算结果。图 7 是在满足系统 94.8% 可用度要求下的预防维修周期区间内对应的三维坐标图。

从表 3 可知,当  $T=5.6, S=1 833$  时,系统在周期内单位时间总维修成本最小,最小成本为 3 314。同时也可知,当  $T$  值过小或过大时都会导致总维修成本增加。当  $T$  值减小时,设备在周期内执行预防维修次数

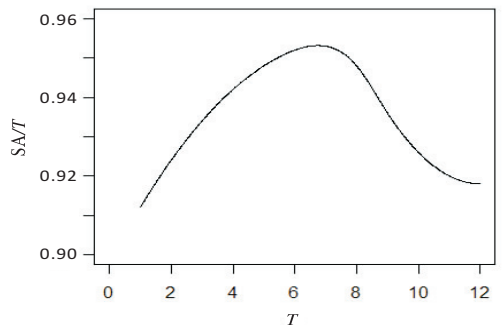


图 6 不同预防维修周期下的系统可用度逐渐增加,使得维修成本增加和停机损失增加。当  $T$  值增加时,设备在周期内发生随机故障次数逐渐增加,

增加维修成本以及停机损失成本。文中构建的不完美预防维修模型的数值分析结果与企业实际的维修情况比较符合,所以该不完美预防维修模型是有效且可行的,可帮助制造企业制订高效的设备维修优化方案。

表3 不同  $T$  值下最佳库存及最小生产成本

$T_i$	$S_i^*$	CT( $S_i^*, T_i$ )	$T_i$	$S_i^*$	CT( $S_i^*, T_i$ )
5.0	1 610.7	3 339.4	5.1	1 651.4	3 334.8
5.2	1 690.6	3 330.1	5.3	1 732.4	3 329.5
5.4	1 760.8	3 320.5	5.5	1 796.4	3 315.6
<b>5.6</b>	<b>1 832.7</b>	<b>3 314.0</b>	5.7	1 869.4	3 314.5
5.8	1 915.0	3 323.9	5.9	1 949.1	3 324.0
6.0	1 975.0	3 318.1	6.1	2 012.8	3 322.6
6.2	2 050.7	3 329.0	6.3	2 089.3	3 337.2
6.4	2 127.7	3 345.4	6.5	2 165.4	3 354.3
6.6	2 212.9	3 372.1	6.7	2 257.1	3 388.9
6.8	2 303.8	3 407.4	6.9	2 350.6	3 427.4
7.0	2 399.7	3 449.9	7.1	2 448.5	3 473.1
7.2	2 499.3	3 498.7	7.3	2 550.6	3 524.9
7.4	2 601.7	3 551.6	7.5	2 652.9	3 578.7
7.6	2 698.1	3 601.7	7.7	2 744.4	3 625.1
7.8	2 789.2	3 647.8	7.9	2 836.2	3 672.8
8.0	2 883.6	3 698.2			

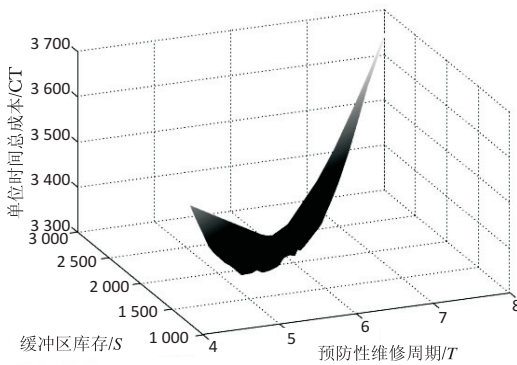


图7 不同  $T$ 、 $h$  下的单位时间维修总成本

## 5 结束语

针对 2M1B 生产系统,考虑实际维修不可能对设备“修复如新”,构建了一个可用度约束条件下的设备不完美预防维修模型。通过准更新过程,描述了设备在周期内的随机故障次数。在此基础上,分析了缓冲区内库存变化对总成本的影响,构建了周期内单位时间总成本模型,其中总成本包括设备故障维修成本、预防维修成本、缓冲库存的持有成本和缺货成本。以满足系统最低可用度水平为约束条件,以周期内单位时间总成本最小为优化目标,通过模型的优化求解思路获得最优预防维修周期以及在此周期下的最佳缓冲区库存,并通过一个算例分析验证了模型的有效性。

## 参考文献:

[1] WIJINGAARD J. The effect of inter-stage buffer storage on

the output of two unreliable production units in series, with different production rates [J]. AIIE Transactions, 1979, 11 (1):42-47.

[2] VAN DER DUYN SCHOUTEN F A, VANNESTE S G. Maintenance optimization of a production system with buffer capacity[J]. European Journal of Operational Research, 1995, 82(2):323-338.

[3] SALAMEH M K, GHATTAS R E. Optimal just-in-time buffer inventory for regular preventive maintenance [J]. International Journal of Production Economics, 2001, 74 (1-3):157-161.

[4] CHELBI A, AIT-KADI D. Analysis of a production/inventory system with randomly failing production unit submitted to regular preventive maintenance [J]. European Journal of Operational Research, 2004, 156(3):712-718.

[5] 陆志强, 王佳跃, 周炳海. 带缓冲区的可修复设备多目标预防性维护决策模型 [J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16 (10):2124-2128.

[6] 周炳海, 高忠顺. 带缓冲区的设备预防性维护优化建模 [J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(2):364-368.

[7] LIAOG L. Optimum policy for a production system with major repair and preventive maintenance [J]. Applied Mathematical Modelling, 2012, 36(11):5408-5417.

[8] 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.

[9] DAHANE M, CLEMENTZ C, REZG N. Effects of extension of subcontracting on a production system in a joint maintenance and production context [J]. Computers and Industrial Engineering, 2010, 58(1):88-96.

[10] 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.

[11] NURSANTI E, SIMATUPANG T, LSKANDAR B P, et al. Cost and availability functions using imperfect maintenance policy for a serial system [C]//IEEE symposium on business, engineering and industrial applications. Bandung, Indonesia: IEEE, 2012:386-391.

[12] MABROUK A B, CHELBI A, RADHOU M. Optimal imperfect maintenance strategy for leased equipment [J]. International Journal of Production Economics, 2016, 178:57-64.

[13] 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.

[14] 张友鹏, 杨凯雄, 石磊. 可靠度约束下不完全预防性维护经济优化模型 [J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(12):3019-3026.

[15] SAMET S, CHELBI A, HMIDA F B. Repairable systems availability optimization under imperfect maintenance [J]. Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences, 2009, 57(3):249-256.