

考虑批量生产的设备视情维护策略优化研究

汤乐成, 刘勤明, 叶春明, 王上润

(上海理工大学 管理学院, 上海 200093)

摘要: 针对目前市场环境对批量生产中的交付时间、产品质量以及企业信誉愈发看重的情况, 提出了考虑三者联合的设备维修策略。首先, 在已知产品质量和设备劣化状态存在一定函数关系的情况下, 将其衍生至次品率上并将单位周期生产结束后的设备状态与生产时间相结合, 进行预防性维护和设备更换的维修方式选择。其次, 根据时间阈值和预防性维护阈值, 以经济效益最优为决策目标, 建立考虑批量生产的视情维护总成本模型。针对提出的优化模型, 将蒙特卡洛仿真法和响应面分析法中的中心组合设计法相结合, 对模型进行求解。最后, 通过算例分析, 证明了模型的有效性和可靠性。

关键词: 视情维护; 批量生产; 蒙特卡洛仿真法; 响应面分析法; 预防维护

中图分类号: TB 472; F 273.4

文献标志码: A

Optimization of equipment condition-based maintenance strategy considering batch production

TANG Lecheng, LIU Qinming, YE Chunming, WANG Shangrun

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

Abstract: In view of the increasing emphasis of the current market environment on the delivery time, product quality and enterprise reputation in mass production, an equipment maintenance strategy considering the interaction among these three factors was proposed. First of all, if product quality and equipment deterioration state were known to have a certain functional relationship, it was derived to the defective rate, and the equipment state after the end of the unit cycle was combined with the production time to choose the maintenance mode of preventive maintenance and equipment replacement. Then, according to the time threshold and the preventive maintenance threshold, the optimal economic benefit was taken as the final objective to establish the total maintenance cost model in consideration of batch production. Aiming at the proposed optimization model, the Monte Carlo simulation method and the central combination design method in response surface analysis were combined to solve the model. Finally, the effectiveness and reliability of the model were proved by a computing example.

Keywords: condition-based maintenance; batch production; Monte Carlo simulation; response surface analysis; preventive maintenance

收稿日期: 2020-08-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (71632008, 71840003); 上海市自然科学基金资助项目 (19ZR1435600)

第一作者: 汤乐成 (1996-), 男, 硕士研究生。研究方向: 设备维护与决策。E-mail: 1519199871@qq.com

通信作者: 刘勤明 (1984-), 男, 副教授。研究方向: 维护调度、人工智能等。E-mail: lqm0531@163.com

随着科学技术的飞速发展, 各类高科技产品的横空出世不仅给企业带来了巨大的机遇与挑战, 同时也大大提高了对生产设备的要求。由于生产设备的逐渐复杂化、精细化, 设备维修与管理已经不再是一项辅助性投入, 而维修成本也成为了企业经济效益中最为重要的一环。据统计, 设备的维修费用甚至可以高达总生产费用的 70%~80%^[1]。因此, 制定一个合理的维修决策方案成为了企业需要首当其冲考虑的问题。

自 20 世纪 90 年代以来, 越来越多的学者将目光投向了设备维护策略, 以及将设备的各种生产情况与设备维修相结合的联合优化问题。目前设备维护策略大致分为 3 类: 设备运行直至故障后的故障维修、基于设备劣化状态或役龄的预防性维修, 以及基于设备运行状态的视情维修。由于近几年传感设备、故障预测、设备诊断等技术的兴起, 视情维护的实现变得更为容易, 且视情维护根据设备的实时运行状态来确定维修方法和维修时间, 因此视情维护比预防性维护和故障维护更为高效, 应用也更为广泛^[2]。文献 [3] 回顾了 2001—2018 年发表的 200 多篇关于维护建模和优化的论文, 研究了在维护方法中的状态监视、检查、替换、修复, 以及系统中的单元之间可能存在的各种类型的依赖关系。文献 [4] 在分析传统维修方式利弊的基础上, 为了提高企业的经济效益, 并保持在全球市场上的竞争力, 建立了基于远程诊断与状态检测(RDCM)的视情维护体系结构。

批量生产是指企业在一定时期内, 生产质量和结构完全相同的产品。在批量生产中, 最为关键的就是确定单位批量的大小和合适的维修时间。批量过大会导致设备严重劣化甚至损坏, 大大增加了维修费用(更换费用), 也会导致供大于求, 产生较大的库存费用。而批量过小, 则会导致设备开关及维修频繁, 无法满足市场需求量等。文献 [5] 建立了一个数学模型来优化生产单一产品的单机生产系统的预防性维修年龄和批量大小, 该模型考虑了维修、库存、不合格品和短缺成本的平均总价值。文献 [6] 考虑了一个混合制造-再制造系统, 考虑了制造、再制造和维护策略的组合优化, 以达到尽量减少总成本, 包括制造、再制造、维修、库存和积压成本的目的。

目前对于二者的联合系统优化, 已有学者进行了一些研究。文献 [7] 将视情维护运用于建筑设备之中, 以设备可靠性理论(RCM)为基础, 将建筑设备失效后果定义为安全性后果和任务型后果

中的较大值, 最后以定量化的方式对维护策略的决策模型进行评价, 考虑了多种维护方式。文献 [8] 将多目标问题与批量生产相结合, 通过加权法和多目标遗传算法来求解多目标优化问题。文献 [9] 和文献 [10] 开始考虑将视情维护应用于生产过程中, 其中文献 [9] 将经济批量生产与视情维护策略进行了联合建模, 以期解决复杂生产系统下的生产和维护优化联合问题, 考虑了在多部件的复杂系统下, 设备发生随机劣化的视情维护方案。而文献 [10] 将产品质量和设备劣化情况相挂钩, 以产品质量和设备生产后的检测状况作为反馈信息, 进行维护决策。

在上述研究中, 决策方案仅取决于产品质量或设备状态, 并未考虑企业在面对不同订单量的实际情况时, 需同时兼顾经济收益和交付期、产品质量及数量等因素。因此, 本文详细描述了企业面对某一数量的订单时, 设备劣化产生的次品对完成定额数量产品生产, 以及交付时间、企业信誉等带来的多重影响。通过 Gamma 过程刻画设备劣化状态, 将预防性维护阈值和时间阈值作为决策变量, 建立总成本模型, 再通过蒙特卡洛仿真法对模型进行求解, 获得实现企业经济效益最高的方案。

1 模型描述

1.1 生产系统

考虑一个批量生产设备, 该设备能以生产速度 P 生产某商品。当无订单时, 为不产生额外的库存费用, 该设备不进行生产并处于关机状态。当有订单时开机生产, 直至完成与订单数量相符的合格品生产后关机。

该系统在运行过程中会不断劣化, 当劣化到一定程度后发生设备功能故障, 需更换设备。本文采取 Markov 过程中的一类特殊情况——Gamma 过程来刻画该设备的劣化过程。该过程是一种单调的、具有非负增量的随机过程, 适用于描述设备随着时间增长而产生的磨损、疲劳、腐蚀、裂纹扩展、侵蚀等劣化情况^[11]。根据 Gamma 分布的定义, 用 $X(t)$ 来描述该设备在 t 时刻的故障率, 假设设备开始运行时的故障率 $X(0) = 0$, 设备在 $t_1 \sim t_2$ 的时间段内的劣化增量 $X(t_2) - X(t_1)$ 服从形状参数为 α 、尺度参数为 β 的 Gamma 分布, 且设备的平均劣化率为 α/β , 方差为 α/β^2 。概率密度函数为

$$f(x)=\beta^{\alpha}\cdot\frac{x^{\alpha-1}\mathrm{e}^{-\beta x}}{\Gamma(\alpha)},\,x>0\tag{1}$$

$$\Gamma(\alpha)=\int_0^{\infty}u^{\alpha-1}\mathrm{e}^{-u}\mathrm{d}u,\,\alpha>0\tag{2}$$

由设备劣化情况可以得出设备在*t*时刻的故障率为

$$X(t)=\int_0^t f(x)\mathrm{d}x\tag{3}$$

故障次数为

$$h(t)=\int_0^t X(k)\mathrm{d}k\tag{4}$$

1.2 视情维护策略

视情维护策略即为基于设备的当前状态来确定是否对设备进行维修以及怎样对设备进行维修，在实际的视情维护中，设备的大部分修复都不能做到“修复如新”。因此，引入由文献 [12] 研究的故障率递增因子概念来描述随着维修次数的增加设备加速劣化的现象，如图 1 所示。图中，*P*(*X*(*t*)) 为设备的虚拟年龄，*V* 为预防性维护阈值。经过第 *n* 次预防性维护后，设备劣化值函数为 *X*(*n*+1)(*t*) = *bX*(*n*)(*t*)，故障次数为 *h*(*n*+1)(*t*) = *bh*(*n*)(*t*)，其中，*b* > 1 为故障率递增因子 [12]。

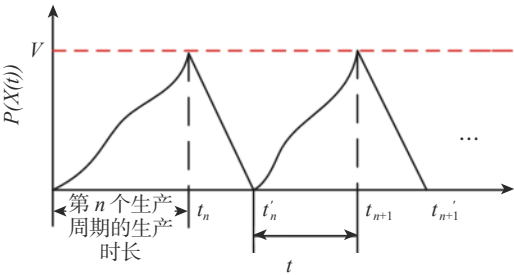


图 1 设备劣化过程示意图
Fig.1 Schematic diagram of the equipment degradation process

有研究表示可以把一个表示*t*时刻生产设备减少年龄的分段、连续变量称为虚拟年龄(也称为有效年龄)，该变量可用来测量每个事件对生产设备真实年龄的影响度，而在*t*时刻设备生产次品的概率也和设备的虚拟年龄有关 [13]，其关系式为

$$P(X(t))=p_0+\eta[1-\mathrm{e}^{(-\lambda X(t)^\gamma)}]\tag{5}$$

式中：*p*₀为系统在全新状态下的初始次品率；*η*为质量退化的边界值；*λ*与 γ 为正常数。

为了保证设备的正常运行和经济效益，同时能尽可能地提高产品质量，本文引入预防性维护阈值*V*来确定是否进行设备维护。由于设备的加速劣化会导致设备在不同周期到达同一预防性维护

阈值*V*的时间逐渐缩短，而设备的劣化也会引起产品质量的下降，需定期对设备进行更换。为了确定更换时机，本文引入时间阈值*W*，即当设备两次的维修间隔时间小于时间阈值*W*时，对设备进行更换。

2 模型假设

- a. 在设备运行中，经常会出现由于设备劣化而导致的设备突发性功能故障，可通过对故障率函数积分得出。本文将该情况下修复设备劣化状况至故障前的维修方式定义为小修，小修仅能恢复运行状态，不改变故障率。
- b. 设备的预防性维护是将其劣化值从当前状态恢复接近至初始状态，本文为方便计算假设预防性维护时间均相同。
- c. 生产过程为批量生产，因此在到达预防性维护阈值时，从第二天开始进行维修。
- d. 本文对次品选择再加工的方式以确保订单量的准确完成，而由于目前大部分加工设备的次品率都很低，因此只考虑第一次加工所产生的次品，忽略第二次以后加工所产生的次品，防止无限循环。

3 模型构建

生产效率和生产成本是所有企业关心的问题，在满足交付条件的情况下，建立总成本模型如下：

$$\min C=\min\left[\sum_{n=1}^k C_{P,n}+C_{I,n}+C_{D,n}+C_{O,n}\chi(A)\right]\tag{6}$$

式中：*C*为完成订单量*Q*的总成本费用；*C*_{*P,n*}为设备维护费用；*C*_{*I,n*}为产品库存费用；*C*_{*D,n*}为设备劣化所产生的次品损失费用；*C*_{*O,n*}为生产时长超过合同商定完成日期*T*_{*Q*}所产生的逾期费用； $\chi(A)$ 为示性函数，即当*A*事件发生时， $\chi(A)$ 等于 1，不发生则等于 0。

a. 维护费用*C*_{*P,n*}。

当设备的劣化值达到预防性维护阈值*V*时，对设备进行停机维护，维护时长为*t*_{*n*}' - *t*_{*n*}。随着设备的不断运行，设备的生产时长*t*_{*n*}+1 - *t*_{*n*}'逐渐减少，当其小于时间阈值*W*时，进行设备更换。

预防性维护费用*C*_{*P,n*}¹：

$$C_{P,n}^1=c_{p,n}^1t^1\chi(P)\tag{7}$$

设备更换费用 $C_{P,n}^2$:

$$C_{P,n}^2 = c_{p,n}^2 t^2 (1 - \chi(P)) \quad (8)$$

当设备进行预防性维护时, $\chi(P) = 1$; 进行设备更换时, $\chi(P) = 0$ 。

小修费用 $C_{P,n}^3$:

$$C_{P,n}^3 = c_{p,n}^3 h_n = c_{p,n}^3 \int_0^{t_n} X(i) di \quad (9)$$

式中: $c_{p,n}^1$ 和 t^1 为单位时间设备预防性维护费用和维护时间; $c_{p,n}^2$ 和 t^2 为单位时间设备更换费用和更换时间; $c_{p,n}^3$ 和 h_n 为单位次数设备小修费用和设备故障次数。

综上, 总维护费用为

$$C_{P,n} = \sum_{i=1}^3 C_{P,n}^i \quad (10)$$

b. 库存费用 $C_{I,n}$ 。

由于交付方式为订单全部完成后统一交付, 因此在生产过程中会产生一定量的库存费用。库存费用可以分为生产期间库存费用 $C_{I,n}^1$ 和维修期间库存费用 $C_{I,n}^2$ 。由于设备生产速度固定为 P , 因此第 i 天产生库存费用的产品数为 Pi , 而在第 n 个生产周期内产生的库存成本可以看作每天产生的库存成本之和, 即为等差数列。记第 n 个周期之前共生产了 I_{n-1} 件产品, 维护时长 $t_n^1 = t_n' - t_n$, 生产时长 $t_n^2 = t_n - t_{n-1}'$, 第 n 个生产周期的库存费用为

$$C_{I,n} = C_{I,n}^1 + C_{I,n}^2 = \left(\frac{(P + t_n^1 P) t_n^1}{2} + I_{n-1} t_n^1 \right) c_{i,n} + (I_{n-1} + t_n^1 P) c_{i,n} \quad (11)$$

式中, $c_{i,n}$ 为单位产品单位天数的库存费用。

c. 次品费用 $C_{D,n}$ 。

设备生产过程中, 因为劣化等原因会生产出部分次品, 为了生产与订单数量相同的产品, 需要在完成全部加工(第一次加工)后根据产出次品数来进行额外加工, 将该过程记为第二次加工。第二次加工在第一次加工完成后继续根据设备状态进行生产, 因此仍然会产生相应的费用。第 n 个生产周期生产的次品数为

$$d_n = P \int_0^{t_n^2} P(X(t)) dt \quad (12)$$

第一次加工所产生的总次品数为

$$D_n = \sum_{n=1}^k d_n \quad (13)$$

次品费用可分为次品损失费用和次品再加工

费用, 再加工费用的计算可将产生的总次品数 D_n 和订单量 Q 的和作为新的订单数 Q' 进行计算, 而次品损失费用为

$$C_{D,n} = D_n c_{d,n} \quad (14)$$

式中, $c_{d,n}$ 为单位次品损失费用。

d. 逾期费用 $C_{O,n}$ 。

当完成全部生产的时间超过了合同约定的时间 T_Q 时, 则产生逾期费用, 即 $\chi(A)=1$ 。总生产时间为

$$T = \sum_{n=1}^{k'} t_n' \quad (15)$$

式中: k' 为新订单数 Q' 下的新生产周期数。当 $T > T_Q$ 时, 产生逾期费用 $C_{O,n}$ 。

将式(10)、式(11)、式(14)、式(15)代入式(6)中, 可以得到某产品完成订单量 Q 生产所需要的总费用。

4 模型求解

上述的总费用求解模型包含了大量的随机因素, 且涉及了多个变量, 因此, 想要得到确切的解析表达式或精准的数值解十分困难。本文选择使用蒙特卡洛仿真法来求得在每组不同的预防性维护阈值 V 和时间阈值 W 情况下的模型的解, 再运用响应面分析法对仿真得到的数据进行线性回归分析, 得到一个二阶的费用回归模型, 最终得到模型的最优解。求解过程总共分为两步。

4.1 蒙特卡洛仿真

根据随机给定的一组决策变量 (V, W) , 通过蒙特卡洛法进行多次仿真得到相应的总费用。在进行仿真之前, 首先对模型进行收敛性分析以确定仿真结果的收敛性; 再通过仿真设备系统的劣化过程, 得到整个生产过程中的设备预防性维护次数、设备更换次数、设备次品数和总生产时长等; 最后将数据代入费用计算公式中, 得出维修费用、库存费用和次品费用, 以及是否存在逾期费用, 并将其相加得到最后的总费用。具体的计算步骤如下所示。

步骤1 输入初始参数。

a. 系统参数: 如订单量 Q 、交付日期 T_Q 、设备形状参数 α 和尺度参数 β 。

b. 决策变量: 设备预防性阈值 V 和时间阈值 W

c. 仿真参数: 设备劣化时间 t 。

步骤2 模拟设备系统的劣化。

- a. 在经过单位时间后的 t 时刻对设备的劣化程度 $X(t)$ 进行计算, 同时更新在 t 时刻内所产生的次品数。
- b. 将劣化程度 $X(t)$ 与预防性维护阈值 V 进行比较。如果 $X(t) < V$, 则继续进行生产; 如果 $X(t) \geq V$, 计算从上次维护到此时的时长 T , 并将 T 与时间阈值 W 进行比较。如果 $T < W$, 则进行预防性维护, 更新设备劣化分布为 $X_{(n+1)}(t) = bX_n(t)$; 如果 $T \geq W$, 则进行设备更换, 并重置设备劣化情况(修复如新)。

步骤3 次品再生产。

在完成订单量 Q 后, 统计生产所得的所有次品并重置新的订单量为次品总数, 并以设备当前的劣化状态继续生产。

步骤4 总费用计算。

以订单量 Q 和次品数的和作为总产品数来计算设备维修费用 $C_{P,n}$ 和产品库存费用 $C_{I,n}$, 根据次品数计算次品费用 $C_{D,n}$, 将生产总时间 T 与合同商定时间 T_Q 进行比较, 如果 $T > T_Q$, 则产生逾期费用

$C_{O,n}$ 。最终输出总费用为

$$\min C = \min \left[\sum_{n=1}^k C_{P,n} + C_{I,n} + C_{D,n} + C_{O,n} \chi(A) \right] \quad (16)$$

4.2 响应面分析法

响应面分析法是采用多元二次回归方程来拟合因素和响应值之间的函数关系, 并通过对其进行分析来寻求最优解的一种统计方法。

本文通过响应面分析法对仿真所得到的数据进行分析, 运用 Design-Expert 软件拟合一个三维空间中的曲面(二阶回归模型), 即

$$C = a_0 + a_1 V + a_2 W + a_{12} VW + a_{11} V^2 + a_{22} W^2 \quad (17)$$

通过响应面分析法可以将非线性非直观的实验设计优化方法转化为一个函数关系, 以供直观迅速地找到最优解的近似解以及其优化区域。式(15)中的 $a_0 \sim a_{22}$ 均可通过软件求解, 总体流程如图2所示。

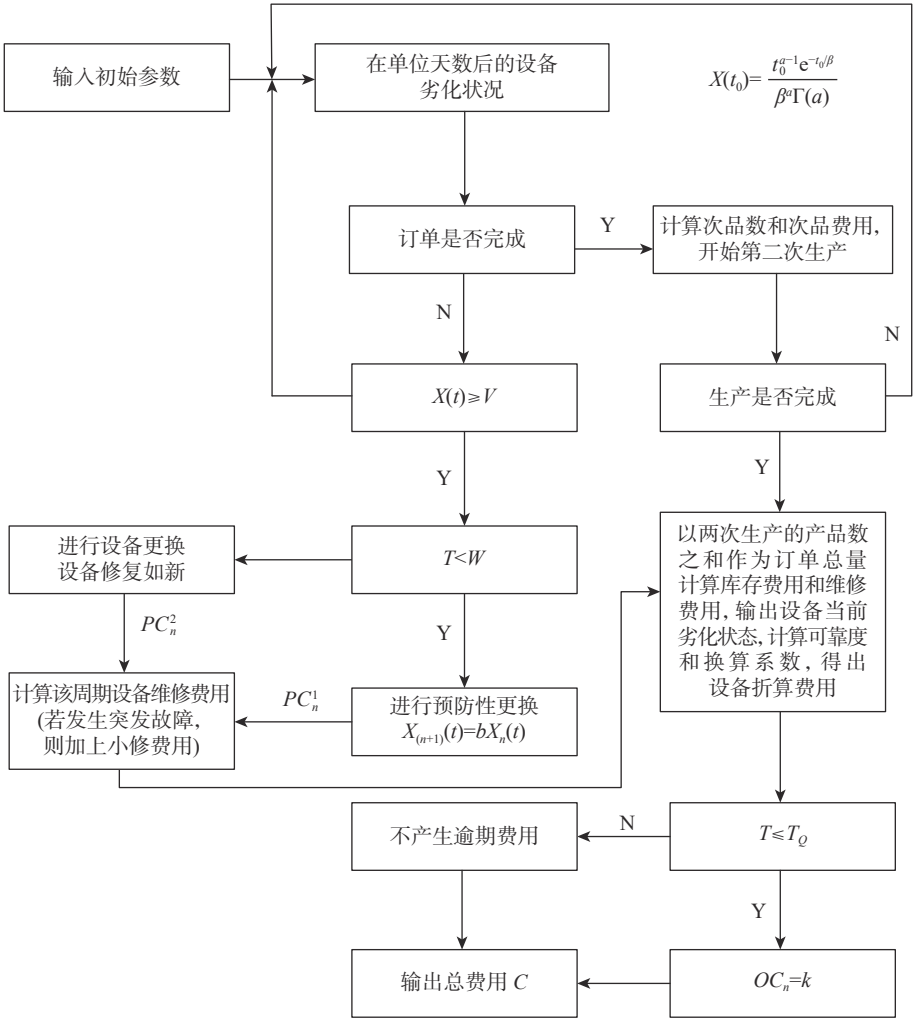


图2 仿真算法流程图

Fig.2 Flow chart of the simulation algorithm

5 算例分析

5.1 数据分析

假设某企业有一大型机械生产设备, 该设备的生产率为 300 件/d, 收到的订单量为 24000 件, 预定交付期限为 100 d。设备进行预防性维护费用为 2 000 元/d, 维护时间为 1 d, 设备进行更换的费用为 4200 元/d, 更换时间为 2 d, 小修费用为 500 元/次。产品库存费用为每天 0.01 元/件, 次品再生产费用为 50 元/件, 逾期产生的违约费用为 50000 元。通过对设备的历史数据和资料可拟合出关于设备的一些基本信息为: $\alpha=1$, $\beta=0.1$, $b=1.1$, $p_0=0.04$, $\eta=0.8$, $\lambda=0.05$, $\gamma=1.1$ 。

本文首先通过蒙特卡洛仿真法, 在取值范围内对 500 组任意不同组合的预防性维护阈值*V*和时间阈值*W*进行 500 次仿真, 得到对应的总成本。根据响应面分析法中对 2 因素 1 响应结果分析效果最好的中心组合设计法 (central composite design) 的要求, 选取 13 组有效的仿真结果, 如表 1 所示。

表 1 13 组有效仿真结果			
Tab.1 Thirteen groups of effective simulation results			
组别	预防性维护阈值 <i>V</i>	时间阈值 <i>W</i>	响应结果
1	0.55	3	119 747
2	0.60	2	118 276
3	0.60	3	122 301
4	0.60	4	124 959
5	0.65	2	118 858
6	0.65	3	117 259
7	0.65	4	121 889
8	0.70	2	120 704
9	0.70	3	118 654
10	0.70	4	122 110
11	0.75	2	122 804
12	0.75	3	122 804
13	0.75	4	124 814

再运用 Design-Expert 软件对 13 组数据进行二次回归方程拟合, 并进行方差分析, 结果如表 2 所示。

根据方差分析中对模型的显著度检验结果进行分析, *p*-value 的值为 $0.0421 < 0.05$, 证明该模型具有统计学意义。因此, 可以使用该线性拟合结果来代替非线性关系的真实结果, 以期快速观察

表 2 方差分析 (ANOVA) 相关结果				
Tab.2 Correlation results of ANOVA				
参数	SS	MS	<i>F</i> 检验	<i>P</i> 检验
模型	5.518×10^7	1.104×10^7	4.28	0.042 1
A-V	9.831×10^6	9.831×10^6	3.81	0.091 9
B-W	10 430.88	10 430.88	0.004	0.951 1
AB	6.118×10^6	6.118×10^6	2.37	0.167 5
A2	1.407×10^7	1.407×10^7	5.45	0.052 2
B2	1.048×10^7	1.048×10^7	4.06	0.083 7
残差	1.807×10^7	2.581×10^6		
总和	7.324×10^7			

到模型最优解。二次拟合回归方程为

$$C=2.197\times10^5-3.256\times10^5V+570.93W-15\,643.6VW+2.888\times10^5V^2+1\,938.29W^2\quad(18)$$

根据响应结果数据报告 (表 3) 和拟合结果随两参数变化曲线图 (图 3), 可以得到模型的最优解为: 当预防性阈值 $V=0.628\,5$, 时间阈值 $W=2.39$ 时, 拟合方程取到最小值为 118 058。由于时间阈值的取值必须为正整数, 在具体条件下, 预防性阈值 $V=0.617\,9$, 时间阈值 $W=2$ 时, 得到模型最优解 118 338。即当订单量为 24000 件时, 为达到生产效益最好, 应设定在设备系统的劣化率达到 0.6179 时进行预防性维护, 当单次生产时长少于或等于 2d 时, 进行设备更换, 此时的生产总成本为 118 338 元。

表 3 预测结果及残差			
Tab.3 Prediction results and residuals			
组别	实际值	预测值	残差
1	1.183×10^5	1.184×10^5	-136.14
2	1.223×10^5	1.193×10^5	3012.83
3	1.250×10^5	1.240×10^5	917.72
4	1.189×10^5	1.186×10^5	242.89
5	1.173×10^5	1.187×10^5	-1450.36
6	1.219×10^5	1.227×10^5	-790.79
7	1.207×10^5	1.203×10^5	442.01
8	1.187×10^5	1.196×10^5	-919.86
9	1.221×10^5	1.228×10^5	-652.21
10	1.228×10^5	1.234×10^5	-548.76
11	1.228×10^5	1.219×10^5	921.55
12	1.248×10^5	1.243×10^5	525.28
13	1.197×10^5	1.213×10^5	-1564.16

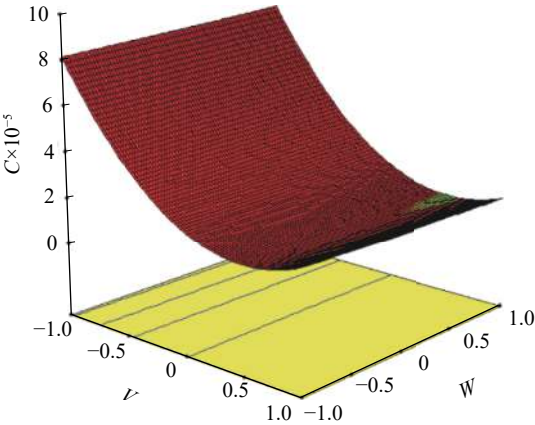


图3 拟合所得响应面图像

Fig. 3 Response surface image obtained by fitting

5.2 结果比较

由于当前社会对企业信誉愈发看重，因此通过将逾期成本从总成本模型中移除，再用以上相同数据进行运算，得出不考虑逾期成本情况下，企业为实现经济效益最好所应采取的维修策略。

当不考虑逾期问题时，上述模型在预防性维护阈值 $V = 0.5326$ 、时间阈值 $W = 1$ 时取到模型最小值 $C_{\min} = 116\,694$ 元，此时的生产时长为103 d。相较之前的结论，在总体维护费用上虽然减少了1644元，但在生产时长上较之前多4 d。对于目前企业的普遍生产规模和能力，4 d时间不仅比1644元更能给企业带来价值，同时能给企业带来信誉和竞争力。

6 结 论

本文从实际问题出发，研究了在某一具体订单量的情况下，如何联合优化批量生产和设备维护，使企业经济效益达到最好。

由于生产设备会随着时间逐渐劣化，导致生产的次品逐渐增多，因此利用Gamma函数和故障率递增因子来描述设备的加速劣化过程，并将次品率与设备劣化的关系通过函数描绘出来，而次品率的存在会导致在完成加工后的合格产品无法达到指定数量，因而在第一次加工完成后根据产生的少量次品数，进行等量的第二次加工。本文选择用设备的劣化水平和单次周期生产时长作为生产约束条件，以此展开考虑各项成本因素，并建立了总成本模型。针对模型的多参数、高不确定性和非线性情况，有效结合蒙特卡洛仿真法和响应面分析法来求出模型最优解。

本文研究的对象为单订单量单生产设备情况

下的生产成本。而实际中的企业往往拥有大量设备，会同时接到多份订单，且生产过程并不是由单一设备完成，需要多个不同设备协调生产。因此，后续研究会本文基础上，向多订单、多生产设备和串并联协调生产等方向发展。

参考文献:

[1] 王凌. 维修决策模型和方法的理论与应用研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2007.

[2] 闫书法, 马彪, 郑长松. 基于油液光谱分析的综合传动视情维护研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(11): 3470–3474.

[3] DE JONGE B, SCARF P A. A review on maintenance optimization[J]. *European Journal of Operational Research*, 2020, 285(3): 805–824.

[4] 赵涛, 韩吉韬, 郭捷. 基于RDCM的设备视情维护系统的技术研究 [J]. 机械设计, 2004, 21(2): 1–4.

[5] SULIMAN S M, JAWAD S H. Optimization of preventive maintenance schedule and production lot size[J]. *International Journal of Production Economics*, 2012, 137(1): 19–28.

[6] POLOTSKI V, KENNE J P, GHARBI A. Joint production and maintenance optimization in flexible hybrid manufacturing–remanufacturing systems under age-dependent deterioration[J]. *International Journal of Production Economics*, 2019, 216: 239–254.

[7] 马智亮, 向星磊, 任远. 基于RCM方法的建筑设备维护策略量化决策模型 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2020, 60(4): 348–356.

[8] 鞠全勇, 朱剑英. 多目标批量生产柔性作业车间优化调度 [J]. 机械工程学报, 2007, 43(8): 148–154.

[9] 成国庆, 周炳海, 李玲. 复杂生产系统经济生产批量与视情维护策略模型 [J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(9): 2270–2278.

[10] 成国庆, 周炳海, 李玲. 劣化系统的生产、质量控制与视情维护联合建模与优化 [J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(7): 1620–1629.

[11] VAN NOORTWIJK J M. A survey of the application of gamma processes in maintenance[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2009, 94(1): 2–21.

[12] 廖雯竹, 潘尔顺, 奚立峰. 基于设备可靠性的动态预防维护策略 [J]. 上海交通大学学报, 2009, 43(8): 1332–1336.

[13] BOUSLAH B, GHARBI A, PELLERIN R. Integrated production, sampling quality control and maintenance of deteriorating production systems with AOQL constraint[J]. *Omega*, 2016, 61: 110–126.