

考虑设备劣化及返工的质量批量模型研究

方叶祥, 王洪冬, 钱 庆, 樊树海

(南京工业大学 经济与管理学院, 江苏 南京 211816)

摘要: 为了得到最大质量批量, 研究了返工成本边际效应下的期望利润值计算方法, 将生产过程分为两个阶段: 无需返工和需要返工的连续加工。给出了质量控制策略下批量计算公式以及考虑边际成本下的最大利润所对应的质量批量。采用蒙特卡洛仿真和Design Expert 8.0.6软件拟合, 通过数字实验, 对比了返工成本与未考虑返工成本情况下的期望利润值。研究显示, 考虑返工成本边际效应下的质量批量大于一般的经济批量, 所得期望利润也最大。

关键词: 生产批量; 返工; 响应曲面法; 期望利润

中图分类号: F273; TP391

文献标志码: A

文章编号: 1007-7375(2020)03-0059-06

A Study of the Quality Batch Model Considering Equipment Degradation and Rework

FANG Yexiang, WANG Hongdong, QIAN Qing, FAN Shuhai

(School of Economics and Management, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

Abstract: In order to get the maximum quality batch, the calculation method of expected profit value is studied under the marginal effect of rework cost. The production process is divided into two stages in which one is continuous processing without rework and the other is continuous processing requiring rework. The batch calculation formula under the quality control strategy and the quality batch corresponding to the maximum profit under the marginal cost are given. Monte Carlo simulation and Design Expert 8.0.6 software are used to work out the result. The expected profit value of rework cost is compared with that of no rework cost. Through the digital experiment, the research shows that the quality lot size considering the marginal effect of rework cost is larger than the general economic lot size, and the expected profit at maturity is also the largest.

Key words: production batch; rework; response surface method; expected profit

经典的经济生产批量(economic manufacturing quantity, EMQ)指的是为了使企业库存得到有效控制而制定的生产批量决策模型。此模型由于假设条件限制, 认为设备生产出产品均合格, 且认为设备不会发生失效, 未能综合考虑反映企业设备实际的运行情况, 及生产过程中产品的返工情况, 在应用上与实际有较大的差距。为此, 本文研究质量需要得到保证, 设备维护也需要保证的情况下, 批量模型的计算方法。并将这种情形下的批量称为质量批量。

近年来, 有很多文献从不同的视角对经济生产批量的决策来进行研究。有部分学者从设备维护及质量来补充经济生产批量模型。如Giri等^[1]考虑了

随机的故障停机时间和维修时间, 运用净现值方法建立了设备维修和EPQ的整合费用模型, 并给出了精确的算法。Kim等^[2]不但考虑设备的故障情况, 而且将产品质量的影响引入到整合模型中, 总费用模型中考虑了再加工成本。Chen^[3]认为设备可生产出不合格品, 对不合格品进行重加工, 并对设备进行维护。卢震等^[4]引入役龄回退因子和等效役龄概念进行动态预防性维修成本、故障维修成本及次品修复成本的构建^[5]。文献^[6]认为产品质量和设备劣化水平存在函数关系, 由生产出的产品质量结合设备劣化水平来构建设备维护模型。文献^[7]指出当结束每一次生产批量的制作时, 全面检验所生产的产

收稿日期: 2019-05-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71671089); 江苏省社会科学基金资助项目(15GLB020); 江苏省高校社会科学重点基金资助项目(2017ZDIXM075)

作者简介: 方叶祥(1971-), 男, 安徽省人, 副教授, 博士, 主要研究方向为分布式生产计划协调研究。

品。如果次品率远超规定阈值,则维护设备。

有部分学者结合维护及设备劣化来考虑经济生产批量模型。在对设备劣化及设备维护策略中,大部分的研究假设设备维护后如新。文献[8]研究了在产品需求随机、产品合格率随着设备状态劣化而衰减之间的影响关系。文献[9]研究生产批量计划与设备预防性维护计划集成决策方法。文献[10]考虑了设备劣化引起产品缺陷率增大以及顾客需求波动,利用Gamma过程对上游生产单元的劣化过程进行研究。文献[11]采用非完美预防性视情维修、小修与故障更换相结合的维修策略。文献[12]引入性能可靠度约束,以平均费用率最小为目标进行维护。文献[13]考虑产品质量损失和两台设备的缓冲区,寻求最优维护策略。文献[14]将生产批量、质量阈值以及预防性维护阈值联合起来考虑,构造了费用成本模型。文献[15]提出一种加速劣化模型,研究了加速劣化系统的最优视情维修策略。文献[16]运用随机系数增长来刻画变化的设备状态,由经济生产批量和监测的设备状态建立模型。文献[17]研究将离散制造业生产计划问题与生产设备的非周期预防性维修相结合,优化确定最优的生产计划及设备预防性维修序列。

以上研究局限在某个时间点的决策,但在实际制定生产批量决策时,需要从全流程的视角来考虑加工成本问题,追求最大边际效益,需要考虑到返工产品的边际成本。因此,本文考虑设备生产的返工产品成本的边际效应下的期望利润最大值,以探讨实际生产设备劣化及产品返工情况下的生产批量决策(质量批量决策),为企业制定切实有效的生产批量,获得最大期望利润提供参考。

1 模型描述

1.1 生产设备

在一个生产过程当中,以生产速率为 M 生产某种产品。设一个生产批量为 Q (决策变量之一),设备在运行的过程中会逐渐发生劣化。本文采用Gamma过程来描绘设备的随机劣化路径。由于此过程具有递增、增量平稳的特性,所以可用来描述设备劣化过程的多种情形,如磨损、腐蚀、钝化等^[14]。设生产设备在时刻 t 的劣化量为 $X(t)$ 且设 $X(0)=0$,设备的

劣化预警点设为 V_2 。其中,劣化预警点是指设备运行到劣化量或设备使用寿命警界点。

1.2 不完全维护策略

设备在生产运行过程当中,为保证设备运行的可靠性,降低设备运行的故障风险,通过对设备劣化水平的检测来为预防性维护提供决策支撑。因某些设备监测数据技术的原因,需设备停机后进行检测。因此,在生产结束后检测设备。设预防性维护的阈值为 V_1 (决策变量之二),当设备劣化水平 $X(t) \geq V_1$ 时,假设设备可以继续生产。本文假设维护是不完全的,即使进行了维护,而设备亦不能恢复如新。

1.3 质量控制策略

随着设备的持续运行,设备是处于不断劣化的过程当中,而产品的质量也不断地降低,引用文献[4]中假设次品率是服从幂指数分布 $\varphi(t) = \beta_1 t^\gamma, \gamma > 0, 0 < \varphi < 1$ 。其中,为了区分Gamma分布参数中的 β ,此处系数设为 β_1 。次品数如下:

$$\theta_i = \int_{T_{j-1}}^{T_j} M\varphi(t)dt = \int_{T_{j-1}}^{T_j} M\beta_1 t^\gamma dt. \quad (1)$$

其中, β 是设备次品率, γ 是次品率系数。

经过不完全的预防性维修,设备的性能恢复得到了改善,运用等效役龄的方法,设备的次品率同设备失效率一样有如下变化。设 T 为生产周期, N 为次数, α_i 指的是经过 i 次预防性维修后,改善设备性能的役龄因子,其中 $0 < \alpha_i < 1$ 。

$$\varphi_0(t) = \varphi(t); \quad (2)$$

$$\varphi_1(t) = \varphi(t + T_1^+) = \varphi(t + T - \alpha_1 T); \quad (3)$$

.....

$$\varphi_i(t) = \varphi(t + T_i^+) = \varphi(t + iT - \sum_{j=1}^i \alpha_j T). \quad (4)$$

在 $(0, T)$ 时间内,设备产生的次品数量

$$\theta_1 = \int_0^T M\varphi(t)dt = \int_0^T M\beta_1 t^\gamma dt = \frac{\beta MT^\gamma}{\gamma + 1}. \quad (5)$$

在 $(T, 2T)$ 时间内,设备产生的次品数量

$$\theta_2 = \int_{T-\alpha_1 T}^{2T-\alpha_1 T} M\varphi(t)dt = \frac{\beta_1 M \left[(2T - \alpha_1 T)^{\gamma+1} - (T - \alpha_1 T)^{\gamma+1} \right]}{\gamma + 1}. \quad (6)$$

在 $[(N-1)T, NT]$ 时间内,设备产生的次品数量

$$\theta_N = \int_{(N-1)T - \sum_{i=1}^{N-1} \alpha_i T}^{NT - \sum_{i=1}^{N-1} \alpha_i T} M\varphi(t)dt = \frac{\beta_1 M \left[\left(NT - \sum_{i=1}^{N-1} \alpha_i T \right)^{\gamma+1} - \left((N-1)T - \sum_{i=1}^{N-1} \alpha_i T \right)^{\gamma+1} \right]}{\gamma + 1}. \quad (7)$$

其中, T_i^* 为设备不完全维护 i 次后的有效年龄, iT 是设备在 i 次不完全维护后的原始年龄, $\alpha_i T$ 是经 i 次不完全维护后的役龄回退量。

在生产过程中, 加工完的产品立即接受质量检测, 而检测出的次品中又存在着可返工产品, 可返工产品经过规定的流程返工可获得一定的利益, 即要使得所生产获得利益最大化, 但是返工次数不可能无休止地进行, 所以返工率到达质量控制阈值 R (决策变量之三) 时, 进行预防性更换。

1.4 符号与假设

- 1) 假设生产过程是持续不断的。
- 2) 生产设备为单设备。生产过程包括质量批量生产和返工生产2个环节, 分别在2台不同的设备上。
- 3) 进行预防性维护或预防性更换活动后, 设备的开机时间忽略。
- 4) 假设设备劣化值在 $(0, 1)$ 之间。

2 模型构建

c_n 为预防性维护所需的费用, c_m 为预防性更换所需的费用。 c_s 为设备启动费用, c_a 为设备检测费用, c_h 为单位生产次品的损失。假设 $Q(t)$ 为 $[0, t]$ 内生产批量总数。第 n 个生产批量期为第 n 个批量与第 $n+1$ 个批量之间的时间间隔。记 P_n 为第 n 个生产批量

期内产生的总利润 ($1 \leq n \leq N(t)$), 其包括生产产品获取的利润 P_n , 设备开始的启动费 c_s 、残废品损失 DC_n 、返工成本 TCC , 以及可能存在的设备检测费用 c_a 、预防维护费用 c_n 、预防更换费用 c_m 。记 t_n 为第 n 个生产批量开始的时刻, $\Delta = Q/M$ 作为一个批量的生产时间。根据设备的随机劣化行为, 第 n 个生产批量对应有3个互斥的随机事件 $\{A_i | i = 1, 2, 3\}$, $\{A_1\}$ 表示批量生产过程中设备未发生故障, 返工率未到达质量控制阈值 R , 且生产批量结束后设备劣化水平 $X(t_n + \Delta)$ 检测到的值未达到预防性维护阈值 V_1 , 无需维护。 $\{A_2\}$ 表示在批量生产的过程中设备劣化水平超过预防性维护阈值 V_1 , 需进行预防性维护。 $\{A_3\}$ 表示在批量结束时, 劣化水平超过劣化预警点 V_2 时, 为了使利润获得最大化, 此时可继续进行产品生产活动, 此时生产的产品会产生返工, 但返工所需的成本不大于所获得利润的时候, 可继续生产, 维持生产活动持续进行。当返工率到达质量控制阈值 R 时, 需要进行预防性更换。如图1所示。

根据以上3种情形, 第 n 个生产批量期内产生的总利润用 P_n 可表示为

$$P_n = \sum_{i=1}^3 P_n^{(i)} \cdot \chi\{A_i\}. \quad (8)$$

其中, $P_n^{(i)}$ 表示为在 i 种情况中第 n 个生产批量的总利润。 $\chi\{A_i\}$ 作为示性函数, 其值为1则说明事件

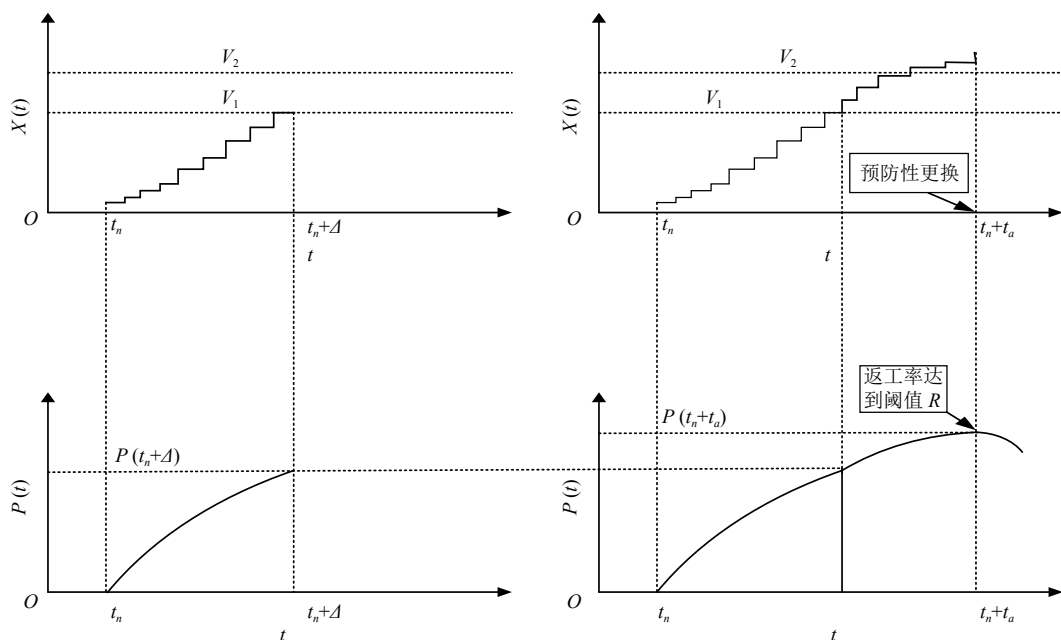


图1 设备在一个生产批量中劣化速率与利润函数变化示意图

Figure 1 Schematic diagram of the degradation rate and profit function of a device in a production batch

A_i 发生, 否则为0。以下依次求解上述3种情况对应下的利润 $P_n^{(i)}$ 。

情形1 第 n 个生产批量结束后设备无需进行预防性维护。

记 $\theta_N^{(1)}$ 表示在第1种情形下, 本批次内的总次品数。此时, 第 n 个生产批量内总利润包括: 启动费用 c_s 、次品损失 $DC_n^{(1)}$ 及检测费用 c_a , 即

$$P_n^{(1)} = P_{\text{价}}Q - c_s - DC_n^{(1)} - c_a. \quad (9)$$

其中, 次品损失 $DC_n^{(1)}$ 等于单位次品损失 c_h 与次品总数的 $\theta_N^{(1)}$ 的乘积, $P_{\text{价}}$ 为产品价格,

$$\theta_N^{(1)} = \int_{(N-1)T - \sum_{i=1}^{N-1} \alpha_i T}^{NT - \sum_{i=1}^{N-1} \alpha_i T} M\varphi(t)dt, \quad \text{所以}$$

$$DC_n^{(1)} = c_h \theta_N^{(1)} = c_h \int_{(N-1)T - \sum_{i=1}^{N-1} \alpha_i T}^{NT - \sum_{i=1}^{N-1} \alpha_i T} M\varphi(t)dt. \quad (10)$$

将式(10)代入式(9)即可得到第1种情形所对应的利润 $P_n^{(1)}$ 。

情形2 生产过程中设备劣化未达到设备劣化阈值需进行预防性维护。总利润包括: 设备启动费用 c_s 、次品损失 $DC_n^{(2)}$ 、设备检测费用 c_a 及预防性维护所需的费用 c_n 。

$$P_n^{(2)} = P_{\text{价}}Q - c_s - DC_n^{(2)} - c_a - c_n. \quad (11)$$

情形3 生产过程中返工率达到阈值 R 需进行预防性更换。

$M_1—M_N$ 表示生产工艺步骤; 本文主要考虑返工步骤为2步的工艺步骤, S_1 为生产工艺的改变原因; S_2 为上一道工序未达到规定尺寸要求原因; S_3 为生产材料的更替原因; S_4 为由于产品检测出问题的原因。设 A_1 、 A_2 为按返工原因进行分类的步骤。返工成本矩阵、返工概率矩阵如表1、表2所示。

返工过程示意图如图2所示。

因此次品返工成本为

$$TCC = F(A_i, S_j) \times R(A_i, S_j) \times \theta_N^{(3)}. \quad (12)$$

$\theta_N^{(3)}$ 为在第3种情形下生产次品总数, 则 $\theta_N^{(3)} =$

表 1 返工成本矩阵 $F(A_i, S_j)$ 表

Table 1 Rework cost matrix $F(A_i, S_j)$ table

返工步骤	返工原因			
	S_1	S_2	S_3	S_4
A_1	$F_{1,1}$	$F_{1,2}$	$F_{1,3}$	$F_{1,4}$
A_2	$F_{2,1}$	$F_{2,2}$	$F_{2,3}$	$F_{2,4}$

表 2 返工概率矩阵 $R(A_i, S_j)$ 表

Table 2 Rework probability matrix $R(A_i, S_j)$ table

返工步骤	返工原因			
	S_1	S_2	S_3	S_4
A_1	$R_{1,1}$	$R_{1,2}$	$R_{1,3}$	$R_{1,4}$
A_2	$R_{2,1}$	$R_{2,2}$	$R_{2,3}$	$R_{2,4}$

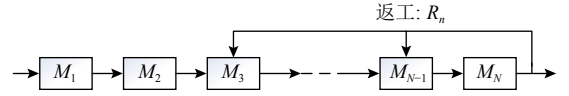


图 2 返工示意图

Figure 2 Rework diagram

$\int_{(N-1)T - \sum_{i=1}^{N-1} \alpha_i T}^{NT - \sum_{i=1}^{N-1} \alpha_i T} M\varphi(t)dt$, 则此时的总利润包括: 设备启动费用 c_s 、次品损失 $DC_n^{(3)}$ 、设备检测费用 c_a 及预防性更换费用 c_m 。

$$P_n^{(3)} = P_{\text{价}}Q - c_s - DC_n^{(3)} - c_a - c_m - TCC. \quad (13)$$

将式(9)、(11)、(13)代入式(8)即可得第 n 个批量之中的总利润 P_n 。

记 $E_{P_n}(Q, V_1, R)$ 是在设备运行下的总利润期望函数。总期望利润函数等于 $[0, t]$ 时间内总期望利润

$\sum_{n=1}^{U(t)} P_n$, 即

$$E_{P_n}(Q, V_1, R) = \sum_{n=1}^{U(t)} P_n. \quad (14)$$

3 数值实验

设一机床设备对某一固体进行车削加工操作, 车削的质量评估标准主要以固体的长度及内径的误差。设 $M=50$ 单位/h、 $c_s=800$ 元/次, $c_a=200$ 元/次, $c_m=7000$ 元/次, $P_{\text{价}}=700$ 元/单位, $c_h=60$ 元/单位。根据设备的历史运行数据及供应商所提供数据拟合得: $\alpha=0.3$, $\beta=0.8$ (α 、 β 为Gamma分布形参和尺参), $V_2=0.95$, $\beta_1=0.8$ (幂指数系数), $\gamma=1.3$ 。

由文献[4]可知, 不完全预防性维护的相关变量如表3所示。

求得次品数

$$\theta_1 = 23.333T_1^{1.5}; \quad (15)$$

$$\theta_2 = 25.094T_2^{1.5}; \quad (16)$$

表 3 不完全预防性维护的相关变量

Table 3 Related variables for incomplete preventive maintenance

序号	c_n	役龄回退因子 α_i
1	5 500	0.941 385 0
2	6 000	0.845 363 8
3	6 500	0.781 000 3

$\theta_3 = 28.901T_3^{1.5}。$ (17)

当设备劣化量小于预防性维护阈值 $X < V_1$ 时

$P_n^{(1)} = 700Q - 800 - 60 \times 23.333T_1^{1.5} - 200。$ (18)

s.t. $0 < T_1 < T_j。$

当设备劣化量大于预防性维护阈值 $X > V_1$ 时

$P_n^{(2)} = 700Q - 800 - 60 \times 25.094T_2^{1.5} - 200 - 6\,000。$ (19)

s.t. $T < T_2 < 2T。$

当返工率大于质量控制阈值 $R(A_i, S_j) \times \theta_N / Mt \geq R$ 时

$P_n^{(3)} = 700Q - 800 - 60 \times 28.901 \times T_3^{1.5} - 200 - 7\,000 - F(A_i, S_j) \times R(A_i, S_j) \times 28.901 \times T_3^{1.5}。$ (20)

s.t. $2T < T_3 < 3T。$

根据三因素的Box-Behnken的实验方案，采用蒙特卡洛仿真运行17组实验，计算出不同情况下的期望利润 $\widehat{E_{p_n}}(Q, V_1, R)$ ，对实验记录数据进行仿真500次。再运用Design Expert 8.0.6软件，确定回归方程参数，并绘制出相应的关系图及相关方差分析，如表4。为了研究生产批量大小 Q 、预防性维护阈值 V_1 、质量控制阈值 R 对利润的影响，通过方差分析， Q 、 V_1 、 R 对 E_{p_n} 值的效应显著($p < 0.05$)。则说明此模型有统计学的意义。失拟项 p 的值 $0.842\,7 > 0.05$ ，则表明无失拟因素存在。二次回归方程如式(21)。

表 4 回归系数及方差分析(ANOVA)结果

Table 4 Regression coefficient and analysis of variance (ANOVA) results

方差来源	平方和	自由度	均方差	F -值	P -值
模型	3 002.06	9	333.56	4.68	0.027 0
Q	30.59	1	30.59	0.43	0.533 3
V_1	38.98	1	38.98	0.55	0.483 6
R	1 774.87	1	1 774.87	24.91	0.001 6
QV_1	9.47	1	9.47	0.13	0.726 1
QR	13.82	1	13.82	0.19	0.672 9
V_1R	47.46	1	47.46	0.67	0.441 3
Q^2	607.06	1	607.06	8.52	0.022 4
V_1^2	250.25	1	250.25	3.51	0.103 0
R^2	125.01	1	125.01	1.75	0.226 9
失拟	347.49	6	57.92	0.38	0.842 7
纯误差	151.21	1	151.21		
核心总数	3 500.76	16			

$\widehat{E_{p_n}}(Q, V_1, R) = -488.87 + 2.47Q + 1\,123.77V_1 - 296.61R + 0.19QV_1 - 0.11QR + 178.49V_1R - 2.03 \times 10^{-3}Q^2 - 796.77V_1^2 + 142.04R^2。$ (21)

由图3可知，未考虑返工成本的近似最优解为 $(Q^*, V_1^*, R^*) = (640, 0.81, 0.3)$ ，期望利润值最大 $E_{p_n} = (Q^*, V_1^*, R^*) = 693.994$ 元。因此生产批量为640的时候，若对设备进行检测，其劣化量超过0.81时进行预防性维护。如果返工率达到0.3则对设备进行预防性更换。

由图4可知，考虑返工成本近似最优解为 $(Q^*, V_1^*, R^*) = (710, 0.7, 0.77)$ ，期望利润值最大 $E_{p_n} = (Q^*, V_1^*, R^*) = 1\,126.37$ 元。因此生产批量为710的时候，若对设备进行检测，其劣化量超过0.70时进行预防性维护。如果返工率达到0.77则对设备进行预防性更换。

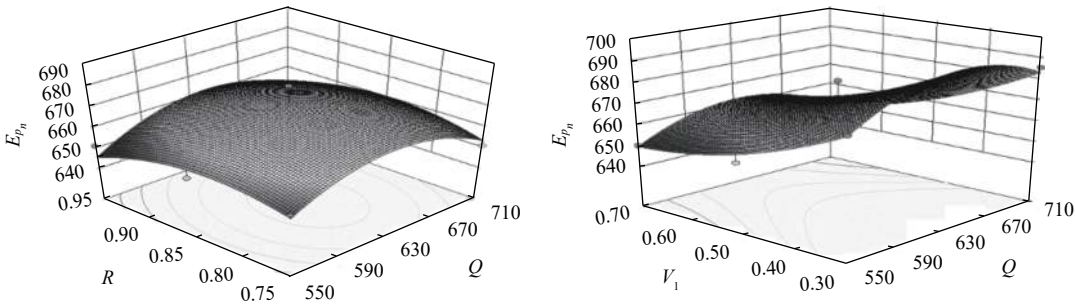


图 3 未考虑返工成本的拟合所得3个影响因素对期望利润影响的三维曲面

Figure 3 Three-dimensional surface that affects the expected profit without considering the rework cost

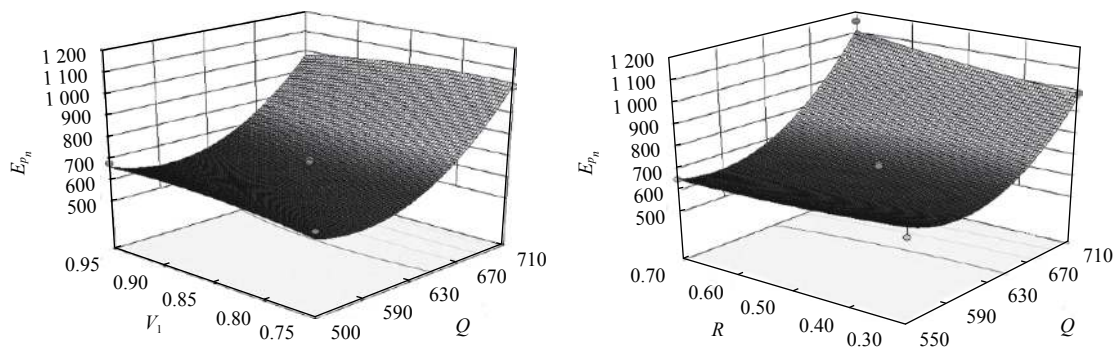


图 4 考虑返工成本的拟合所得3个影响因素对期望利润影响的三维曲面

Figure 4 Three-dimensional surface that affects the expected profit with considering the rework cost

综上, 考虑边际成本的利润和批量大于未考虑的情况, 影响期望利润最重要影响因素是 Q , 其次是 V_1 , 最后是 R 。

4 结束语

本文主要针对设备的劣化状态、生产批量的大小和维护策略进行联合建模。根据质量控制阈值来对设备进行有效的预防性更换。为了使得生产产品的利润得到更大的提升, 通过生产批量、预防维护阈值及质量控制阈值构建决策变量, 构造期望利润最大的优化目标模型。通过对比考虑返工成本的边际效应与未考虑的情况下期望利润的最大值, 得出考虑返工边际成本的生产批量(即质量批量)能够得到期望利润最大。本文对制造企业的生产管理、设备的维护及提高生产产品的质量, 提高生产利润、增加设备的利用率具有一定的参考价值。

本文主要考虑了设备返工成本的边际效应获得最大期望利润。然而, 在实际的生产过程中, 生产设备由多台设备串联或者并联组合而成, 随着设备数量的增加, 对于模型的决策变量及求解难度随之上升。对于更复杂的多设备与维护决策的集成问题还需要进一步研究。

参考文献:

- [1] GIRI B C, DOHI T. Exact formulation of stochastic EMQ model for an unreliable production system[J]. *Journal of the Operational Research Society*, 2005, 56(5): 563-575.
- [2] KIM C H, HONG Y. An optimal production run length in deteriorating production processes[J]. *International Journal of Production Economics*, 1999, 58: 183-189.
- [3] CHEN Y C. An optimal production and inspection strategy with preventive maintenance error and rework[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2013, 32: 99-106.

- [4] 卢震, 郭巧顺, 徐健. 基于周期性不完全预防性维修的最优经济生产批量决策[J]. *系统工程理论与实践*, 2017, 37(10): 2621-2629.

LU Zhen, GUO Qiaoshun, XU Jian. Optimal economic production batch decision based on periodic incomplete preventive maintenance[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2017, 37(10): 2621-2629.

- [5] CHAKRABORTY T, GIRI B, CHAUDHURI K. Production lotsizing with process deterioration and machine breakdown under inspection schedule[J]. *Omega*, 2009, 37(2): 257-71.
- [6] TAPIERO C S. Continuous quality production and machine maintenance[J]. *Naval Research Logistic*, 1986, 33(3): 489-499.
- [7] RADHOU M, REZGN, CHELBI A. Integrated maintenance and control policy based on quality control[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2010, 58(3): 443-51.
- [8] 邵校, 陈志祥, 伏开放. 考虑产品合格率衰变的设备维修与生产决策[J]. *工业工程与管理*, 2017, 22(3): 7-15.
SHAO Xiao, CHEN Zhixiang, FU Kaifang. Equipment maintenance and production decision considering product qualification rate decay[J]. *Industrial Engineering and Management*, 2017, 22(3): 7-15.
- [9] 冷乔, 王丽亚, 赵世雄, 等. 多机串行系统的生产批量与维护计划集成优化[J]. *计算机集成制造系统*, 2016, 22(8): 1945-1952.
LENG Qiao, WANG Liya, ZHAO Shixiong, et al. Integration of production batch and maintenance plan for multi-machine serial system[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2016, 22(8): 1945-1952.
- [10] 周炳海, 刘玉旺. 考虑设备劣化及随机需求的最优生产周期模型[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2017, 38(6): 950-955.
ZHOU Binghai, LIU Yuwang. Optimal production cycle model considering equipment degradation and stochastic demand[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2017, 38(6): 950-955.
- [11] 甘婕, 曾建潮. 考虑劣化状态的单机调度与维修决策集成模型[J]. *控制与决策*, 2016, 31(3): 513-520.
GAN Jie, ZENG Jianchao. Integrated model for single machine scheduling and maintenance decision considering degraded state[J]. *Control and Decision*, 2016, 31(3): 513-520.