

考虑产品质量控制的生产系统预防性维护策略联合优化研究

方 鹏, 李 芳, 刘 凡, 江卓翰

(上海理工大学 管理学院, 上海 200093)

摘要: 针对生产系统因生产异常导致的产品质量特征均值偏移, 提出了设备状态与预防性维护周期相结合的预防维护策略, 运用抽样监测产品质量绘制的均值控制图来判断机器设备的状态, 考虑不同设备更新状况下包括抽样费用、维护费用、质量损失费用和停机损失费用的总费用, 以单位时间期望总费用最小为目标函数, 预防性维护周期与均值控制图参数(样本量、抽样间隔及控制系数)为决策变量建立模型。运用差分进化算法对模型求解以验证其可行性, 并利用灵敏度分析方法验证决策模型的有效性。联合产品质量与预防性维护的决策模型更加符合生产系统的实际情况, 有效提高经济效益。

关键词: 均值控制图; 更新周期; 预防性维护策略; 差分进化算法

中图分类号: F 253.7 **文献标志码:** A

Optimization of preventive maintenance strategy for production system considering product quality control

FANG Peng, LI Fang, LIU Fan, JIANG Zhuohan

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

Abstract: Aiming at the production system where the mean value of product quality characteristics was shifted due to abnormal production, a preventive maintenance strategy was proposed by considering the combination of equipment status and preventive maintenance cycle. Using the mean value control chart to monitor the product quality to judge the status of the machine and equipment, the total cost of sampling costs, maintenance costs, quality loss costs and downtime loss costs was considered under different equipment update conditions. Taking the minimum expected total cost as the objective function, the preventive maintenance period and the parameters of the mean control chart (sample size, sampling interval, and control coefficient) were used as decision variables to establish a model. The differential evolution algorithm was used to solve the model to verify the feasibility, and the sensitivity analysis method was used to verify the validity of the decision-making model. The decision model that combined product quality and preventive maintenance was more in line with the actual situation of the production system and improved the economic benefits of the production system.

收稿日期: 2020-09-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71632008, 71840003)

第一作者: 方 鹏(1996-), 男, 硕士研究生。研究方向: 设备维修管理。E-mail: 18829344088@163.com

通信作者: 李 芳(1966-), 女, 副教授。研究方向: 供应链管理。E-mail: lifang2502@126.com

Keywords: *mean control chart; renewal cycle; preventive maintenance strategy; differential evolution algorithm*

大型机器设备工艺精密、造价高昂，如果设备发生了故障，将会产生高额的成本费用，增加生产成本。在良好的操作条件下保持生产，保证质量标准，以及制定合理的生产计划，这些对于满足客户需求和采用新的管理系统至关重要^[1]。因此，需要经常对设备进行预防性维护，这样可以在减少故障发生的同时维持设备系统持续稳定的运作，对提高产品生产质量、降低生产成本具有重要的作用^[2]。

在过去的几十年中，基于时间的预防性维护研究有许多^[3-5]，这些研究认为预防性维护可以降低设备发生故障的概率，减少设备因发生故障造成的损失。文献^[6]讨论了一种用于制造单元的生产库存控制和预防性维护策略的联合优化集成方法。但对设备进行周期性的预防性维护，会出现过度维修的情形，引起生产时间和生产材料等人力、物力的浪费^[7]。因此，如何确定预防性维护的周期，避免生产设备出现故障的同时降低由于维修行为产生的停工损失与维修成本，成为学者们研究的方向。生产设备进行产品生产，在排除人工技术等外部因素的条件下，产品的质量往往与设备的状态有关。控制图方法作为统计过程控制（statistical process control, SPC）实施的重要检测手段和工具，是基于对生产过程中产品质量的关键特性值进行测定、记录和评估，绘制出相应的产品质量特性值统计图，并根据假设检验原理对生产过程是否处于控制状态进行判断的统计图形方法^[8]。对于生产设备状态的监测，可以通过控制图来进行判断。因此，考虑控制图监测生产设备产品质量与制定维护策略相结合的方法有待进一步的研究。

许多学者开始考虑生产设备、产品质量与维护策略的结合。Ben-Daya等^[9]建立控制图和设备维修的联合经济模型，用来衡量设备预防维修对质量管理成本的影响，研究发现，考虑设备预防维修可以减少总的期望成本。文献^[10]提出绘制产品质量的控制图来对生产设备的状态进行判断，以此来决定采取何种预防性维修策略。文献^[11-12]提供了有关行业中预防性维修计划和方法的文献综述。赵永强^[13]将控制图用来监控设备零备件失效情况，从经济性角度出发，建立预防

维修模型，确定控制图的参数。张斌等^[14]利用马尔科夫链的方法，建立控制图与维修的优化模型，得出了控制图参数和维修周期的确定方法。赵永强^[15]将设备预防维修与均值控制图结合，设置预防维修的警戒边界，发现在控制图预警区域报警时执行预防维修的单位时间期望成本比未考虑预防维修的成本要低。成国庆等^[16]提出了多设备系统的生产批量、质量控制与预知维护联合优化。Khatab等^[17]针对劣化制造系统，提出关于产品质量与基于状态维护的联合优化模型。周炳海等^[18]针对需要实时监控产品质量与设备状态的带缓冲退化生产系统的设备维护问题，提出综合考虑控制图及缓冲区的串行生产系统维护建模方法。Pasha等^[19]在 Ben-Daya 和 Rahim 模型的基础上，采用了降低综合危害程序的方法，将检查间隔确定作为一种保守的策略，进行算例分析。

上述研究涉及控制图与预防性维修的结合，但对控制图不完美检测的情形未深入考虑。控制图在监控过程中可能出现“误报警”与“漏报警”，忽略这样的情况会使控制图发出错误的预防维修信号，造成不必要的损失。李春发等^[20]提出基于不完美监测下的控制图结果，依据更换过程理论制定维修策略，建立模型。本文在此基础上，采用均值控制图对产品质量进行监控，根据控制图的报警信息与预防性维护周期采取相应的设备更新策略，以此建立联合费用模型。本文对考虑产品质量控制的生产系统预防维护策略进行研究，分析了控制图延时报警与异常报警下的情况，将实际可能出现的异常状况纳入考虑范围，具有现实的指导意义，对生产控制、降低费用、分析设备异常情况具有借鉴作用。

1 问题描述

设备在生产产品过程中会存在控制中和失控状态，设备系统处于失控状态时往往不能立即反映出来被直接观察到，但会引起产品质量特性均值的异常偏移，因此可以通过均值控制图来对产品质量进行监控。假设产品的质量特性服从正态分布，控制图会对生产过程中出现的异常状况进行报警。如果未报警，那么在设备运行 T 时间后

进行预防性维护, 对生产系统进行更新; 反之, 控制图在 T 时刻前报警, 则立即检测设备系统状况。假设检测过程十分准确且高效, 检测发现是误报警, 则对设备进行最小维护, 保持原样不更新设备, 假设最小维护时间忽略不计; 检测发现是机器设备内部故障, 则采取故障维修, 设备恢复如新。

采取均值控制图监控, 当系统过程处于控制中状态时, 产品质量特性 $X \sim (\mu, \sigma^2)$; 当系统过程处于失控状态时, 产品质量特性 X 会发生异常偏移, 即 $X \sim (\mu + \delta\sigma, \sigma^2)$ 。其中, δ 表示过程偏移 σ 的平均偏移量, 反映了偏移的程度。因此, 整个更新过程是由设备到达预防性维护时间点进行更新和均值控制图正确报警进行维修更新决定的, 如图 1 所示。

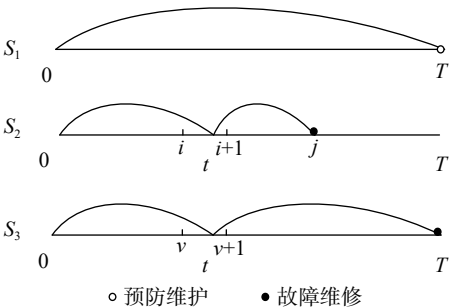


图 1 系统更新情景
Fig.1 System update scenario

图中: 情形 S_1 表示在运行时间 T 内控制图未出现报警或者控制图报警都是误报警, 此时系统在运行 T 时间后的预防维护时间点更新; 情形 S_2 表示在运行时间 t 时刻系统出现异常, 时刻 t 处于第 i 到第 $i+1$ 次抽样检测期间, 而在第 j 次抽样时控制图才正确报警, 因此系统在第 j 次抽样后进行故障维修更新设备; 情形 S_3 表示在运行时间 T 内控制图漏报警, 而实际上系统在 t 时刻已经出现了异常, 系统在运行 T 时间后的预防维护时间点进行故障维修更新设备。

假设每次更新过后设备系统都恢复如新, 将整个更新过程看成一个周期, 管理费用忽略不计。以更新周期内的单位时间期望总费用最低为目标建立模型, 确定合适的预防维护时间间隔 T 以及控制图的参数设置。

2 符号描述及假设

2.1 符号描述

基本符号描述如表 1 所示。

表 1 相关符号描述
Tab.1 Related symbol description

符号	描述	符号	描述
$f(t)$	系统 t 时刻发生异常的概率密度函数	T	预防维护时间间隔
$F(t)$	系统 t 时刻发生异常的分布函数	n	抽样的样本量
T_1	预防维护时间	h	样本抽样的时间间隔
T_2	故障维修时间	k	控制图的控制系数
$T(S_i)$	情形 S_i 下的更新过程总时间	α	控制图误报警的概率
c_a	每次误报警的最小维护费用	β	控制图漏报警的概率
c_1	每次预防维护的费用	T_{ARL_0}	控制中状态下平均运行时间
c_2	每次故障维修的费用	T_{ARL_1}	失控状态下平均运行时间
c_q	每次样品抽样费用	δ	系统异常时过程质量特性均值偏移系数
c_{11}	系统正常运行时的单位损失费用	D	需求率
c_{12}	系统异常运行时的单位损失费用	$E(T)$	更新周期的期望总时间
c_d	系统停机时的单位损失费用	$E(C)$	更新周期的期望总费用
c_s	单位缺货费用	$E(C, T)$	更新周期的单位时间期望总费用
$C(S_i)$	情形 S_i 下的更新过程总费用		

2.2 假设

假设 1 更新时间内会针对不同的情形采用最小化维护、预防性维护和故障维修 3 种维护策略。由于最小化维护是诸如加润滑油等维护行为, 不改变设备状态, 因此假设最小化维护时间忽略不计。

假设 2 假设控制图报警会立即监测判断设备状态, 监测时间忽略不计。

假设 3 系统发生异常时的概率密度函数已知, 表达式为 $f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$, $t \in [0, T]$ 。

3 模型建立

根据以上描述的 3 种更新情形建立均值控制图监测与预防维护策略相结合的联合优化模型, 对依据产品质量绘制的均值控制图、更新周期内的期望时间和期望费用分别进行描述。

3.1 均值控制图

系统生产过程中采用控制图进行监控, 根据产品质量绘制均值控制图。假设设备生产的产品质量特性服从正态分布, 即产品质量特性 $X \sim (\mu, \sigma^2)$ 。系统正常时 $\mu = \mu_0$, $\sigma = \sigma_0$; 系统出现异常时 $\mu = \mu_0 + \delta\sigma$, $\sigma = \sigma_0$, 此时, 质量均值漂移量为 δ 。均值控制图的上限和下限分布表示为

$$X_{UCL} = \mu + \frac{k}{\sqrt{n}} \cdot \sigma \tag{1}$$

$$X_{LCL} = \mu - \frac{k}{\sqrt{n}} \cdot \sigma \tag{2}$$

当产品质量特性均值 $\bar{x}$ 介于控制界限内时(即 $X_{LCL} \leq \bar{x} \leq X_{UCL}$),系统处于控制中状态,系统正常运行;当产品质量特性均值 $\bar{x}$ 超过控制界限时(即 $\bar{x} \geq X_{UCL}$ 或 $\bar{x} \leq X_{LCL}$),系统处于失控状态,需要进行维护更新。其中,控制图正确报警的情景如图2所示。

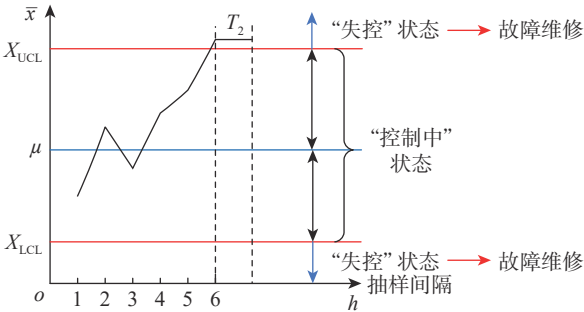


图2 控制图正确报警情景
Fig.2 Correct alarm scenario of control chart

样本均值为 $\bar{x}$, 定义为 $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ 。控制图在监测过程中可能会存在误报或者未能监测出设备状态的情形, 即称为“误报警”与“漏报警”。设控制图出现误报警的概率为 α , 控制图出现漏报警的概率为 β , 则它们分别表示为^[21]

$$\alpha = P(\bar{x} \leq X_{LCL}) + P(\bar{x} \geq X_{UCL}) = F\left(\frac{X_{LCL} - \mu_0}{\sigma/\sqrt{n}}\right) + 1 - F\left(\frac{X_{UCL} - \mu_0}{\sigma/\sqrt{n}}\right) = 2\Phi(-k) \tag{3}$$

$$\beta = P\{X_{LCL} \leq \bar{x} \leq X_{UCL} | \mu = \mu_0 + \delta\sigma\} = F\left(\frac{X_{UCL} - (\mu_0 + \delta\sigma)}{\delta/\sqrt{n}}\right) - F\left(\frac{X_{LCL} - (\mu_0 + \delta\sigma)}{\delta/\sqrt{n}}\right) = \Phi(k - \delta\sqrt{n}) - \Phi(-k - \delta\sqrt{n}) \tag{4}$$

3.2 更新周期内的期望时间和期望费用

导致系统更新的情形有 S_1, S_2, S_3 这3种情况, 因此需要分别计算3种情形下的期望时间和期望费用。各种情形下的更新周期期望时间包括系统运行时间和维护时间, 更新周期期望费用包括样本抽样费用、维修费用、质量损失费用和停机损失费用, 以此建立单位时间期望费用模型。预防性维护周期定义为 T , 抽样时间间隔为 h , 故预防性维护周期内的最大抽样次数为 $m(m = \lceil T/h \rceil)$, $\lceil \cdot \rceil$ 表示对式子取整)。

a. S_1 情形下的期望时间和期望费用。
 S_1 发生即为在预防维护时间点 T 之前未出现系统异常, 则 S_1 出现的概率表示为

$$P_1 = 1 - \int_0^T f(t)dt = 1 - F(T) \tag{5}$$

S_1 情形下的期望时间包括正常运行时间和预防性维护时间, 表示为

$$T(S_1) = T + T_1 \tag{6}$$

S_1 情形下的期望费用包括样本抽样费用、预防维护费用、质量损失费用和停机损失费用, 表示为

$$C(S_1) = mnc_q + c_2 + Tc_{11} + \frac{m}{T_{ARL_0}}c_\alpha + T_1(c_d + c_sD) \tag{7}$$

其中, 质量损失费用包括系统运行的损失费用和误报警造成的损失费用, 而误报警发生的次数为 $\frac{m}{T_{ARL_0}}$ 。 $T_{ARL_0} = 1/\alpha$, 表示控制中状态下平均运行时间。

b. S_2 情形下的期望时间和期望费用。

情形 S_2 表示在运行时间 t 时刻系统出现异常, 时刻 t 处于第 i 到第 $i+1$ 次抽样检测期间, 而在第 j 次抽样时控制图才正确报警, 故系统在第 j 次抽样后更新。该情形下确定会出现正确报警, 计算出现正确报警的概率为 $1 - \beta^m$, 则 S_2 的发生概率为

$$P_2 = \int_0^T f(t)(1 - \beta^m)dt \tag{8}$$

S_2 情形下的期望时间包括正常运行时间、失控状态下的运行时间和故障维修时间, 表示为

$$T(S_2) = T_{in(2)} + T_{out(2)} + T_2 \tag{9}$$

式中, $T_{in(2)}$ 为正常运行时间, 已知系统的失控时间服从指数分布 $F(t)$, 且 S_2 情形下失控时间在 T 时间内发生, 故 $T_{in(2)}$ 的表达式为

$$T_{in(2)} = \int_0^T tf(t)\frac{1 - \beta^m}{P_2}dt \tag{10}$$

$T_{out(2)}$ 为失控状态下的运行时间且失控状态被监测, 则 $T_{out(2)}$ 的表达式为

$$T_{out(2)} = hT_{ARL_1}(1 - \beta^m) \tag{11}$$

式中, $T_{ARL_1} = 1/\beta$, 是失控状态下的平均运行时间。

S_2 情形下的期望时间为

$$T(S_2) = \int_0^T tf(t)\frac{1 - \beta^m}{P_2}dt + hT_{ARL_1}(1 - \beta^m) + T_2 \tag{12}$$

S_2 情形下的期望费用包括样本抽样费用、故障维修费用、质量损失费用和停机损失费用。其中样本抽样次数由运行时间决定, 质量损失费用包括正常运行时的质量损失费用、失控状态下系统运行的质量损失费用以及误报警损失费用, 该

情形下误报警只会出现在系统异常失控时刻 t 前的样本抽样中。故期望费用表示为

$$C(S_2) = \left(\frac{1}{h} \int_0^T tf(t) \frac{1-\beta^m}{P_2} dt + T_{ARL_1}(1-\beta^m) \right) nc_q + c_2 + c_{11} \int_0^T tf(t) \frac{1-\beta^m}{P_2} dt + hT_{ARL_1}(1-\beta^m)c_{12} + \frac{c_\alpha}{hT_{ARL_0}} \int_0^T tf(t) \frac{1-\beta^m}{P_2} dt + T_2(c_d + c_s D) \quad (13)$$

c. S_3 情形下的期望时间和期望费用。

情形 S_3 表示系统在 t 时刻已经出现了异常,但在运行时间 T 内控制图漏报警,则系统在运行 T 时间后进行故障维修。该情形下系统漏报警,计算漏报警的概率为 β^m ,则 S_3 发生的概率为

$$P_3 = \int_0^T f(t) \beta^m dt \quad (14)$$

S_3 情形下的期望时间包括正常运行时间、失控状态下运行时间和故障维修时间。其中由于系统失控状态未被控制图监测出来,在 t 时刻出现异常后系统出现失控直到 T 时刻采取预防性维护进行更新。设 $T_{in(3)}$ 和 $T_{out(3)}$ 分别代表了 S_3 情形下系统的正常运行时间和失控状态下的运行时间,则 $T_{in(3)}$ 与 $T_{out(3)}$ 的表达式分别为

$$T_{in(3)} = \int_0^T tf(t) \frac{\beta^m}{P_2} dt \quad (15)$$

$$T_{out(3)} = T - T_{in(3)} \quad (16)$$

因此,此时的期望时间为

$$T(S_3) = T + T_2 \quad (17)$$

S_3 情形下的期望费用包括样本抽样费用、故障维修费用、质量损失费用和停机损失费用。期望费用表示为

$$C(S_3) = mnc_q + c_2 + c_{11} \int_0^T tf(t) \frac{\beta^m}{P_2} dt + c_{12} \left(T - \int_0^T tf(t) \frac{\beta^m}{P_2} dt \right) + \frac{c_\alpha}{hT_{ARL_0}} \int_0^T tf(t) \frac{\beta^m}{P_2} dt + T_2(c_d + c_s D) \quad (18)$$

3.3 更新周期内的单位时间期望总费用

综合考虑3种情形,根据更新周期内的单位时间期望总费用最小来建立模型,以此来确定预防维护时间点 T 以及控制图的参数 n, h, k 。模型表示为

$$E(C, T) = \frac{E(C)}{E(T)} = \frac{\sum_{i=1}^3 C(S_i) P_i}{\sum_{i=1}^3 T(S_i) P_i} \quad (19)$$

为了得到合适的控制图参数设置与预防维护

间隔期,使更新周期内的单位时间期望总费用最小,其目标函数为 $\min E(C, T)(n^*, k^*, h^*, T^*)$ 。由于目标函数存在多个变量,无法用常规方法直接求解得到最优值,因此需要借助算法工作求解。

4 模型求解算法

差分进化(differential evolution, DE)算法是一种高效的群智能优化算法。本文的目标是获得决策变量 n, k, h, T 的最优解,以求得最小的单位时间期望总费用 $E(C, T)$,图3为差分进化算法流程图。算法中的 $\mathbf{X} = (n, k, h, T)$ 是一个四维解向量。

该模型具体进化求解过程如下:

a. 确定差分进化算法控制参数。其中控制参数设置为种群大小 NP 、进化代数 g 、缩放因子 F 与交叉概率 CR 。

b. 随机产生初始种群。初始种群为一个 n 维参数矢量 $\mathbf{X}_i^t$,表示为 $\mathbf{X}_i^t = (x^t(i, 1), x^t(i, 2), \dots, x^t(i, n))$ ($i = 1, 2, \dots, NP$),其中 NP 为种群大小, n 为决策变量的个数。

c. 对初始种群进行评价,计算初始种群中每个个体的适应度值。

d. 判断是否达到终止条件或进化代数达到最大。若是,则终止进化,将得到的最佳个体作为最优解输出;若否,继续步骤e。

e. 进行变异和交叉操作,得到 $2NP$ 个新的个体。变异操作,随机选取种群中两个不同的个体,将其向量差缩放后与待变异的个体进行向量合成。对于目标个体 $\mathbf{X}_i^t$,对应的变异矢量 $\mathbf{V}_i^t = (v^t(i, 1), v^t(i, 2), \dots, v^t(i, n))$ 表示为 $\mathbf{V}_i^t = \mathbf{X}_{r_3}^t + F(\mathbf{X}_{r_1}^t - \mathbf{X}_{r_2}^t)$ 。其中, F 为缩放因子, r_1, r_2, r_3 为互不相同的个体索引,随机取自于种群集。

交叉操作,将当前个体与选择操作生成的 n 个个体组成小种群,对其中随机的一个个体进行交叉,按照式(20)生成实验个体 $\mathbf{U}_i^t = (u^t(i, 1), u^t(i, 2), \dots, u^t(i, n))$,表示为

$$u^t(i, j) = \begin{cases} v^t(i, j), \text{rand } j \leq CR \text{ or } j = \text{rand } i \\ x^t(i, j), \text{rand } j > CR \text{ or } j \neq \text{rand } i \end{cases} \quad (20)$$

式中: $j = 1, 2, \dots, n$, $\text{rand } j$ 为 $[0, 1]$ 间的随机数; CR 为交叉概率; $\text{rand } i \in (1, 2, \dots, n)$ 是随机选取的变量索引,确保有一维变量由变异变量贡献。

f. 将原种群和 $2NP$ 个新的个体中通过适应度值排序,选取 NP 个最优的个体,得到新一代种群,更新种群最优解。

g. 进化代数 $g = g + 1$,转步骤d。

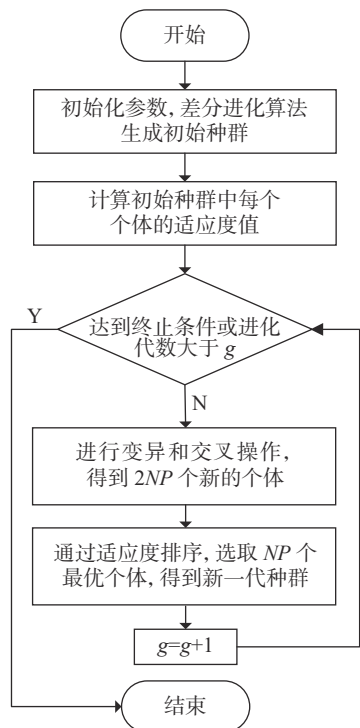


图3 差分进化算法流程图

Fig. 3 Flow chart of differential evolution algorithm

5 算例分析

已知某企业以速率 D 满足恒定且连续的产品需求，其产品质量特性 X 服从正态分布，即 $X \sim (20, 2.5^2)$ ；当设备部件出现异常时， X 的均值偏移量为 $\delta=1.2$ 而标准差不变，整个过程通过均值控制图进行监控。假设该设备出现故障的时间服从指数分布，故障发生的概率密度函数为 $f(x)=0.05e^{-0.05x}$ ，其余的相关参数分别为 $T_1=1.5\text{ h}$ ， $T_2=3\text{ h}$ ， $c_a=10\text{ 元/次}$ ， $c_1=800\text{ 元/次}$ ， $c_2=1\,500\text{ 元/次}$ ， $c_q=25\text{ 元/个}$ ， $c_{11}=20\text{ 元/h}$ ， $c_{12}=45\text{ 元/h}$ ， $c_d=800\text{ 元/h}$ ， $c_s=25\text{ 元/（个}\cdot\text{h}^{-1}\text{）}$ ， $D=20\text{ 个/h}$ 。参数设置为：种群大小 $NP=20$ 、进化代数 $g=300$ 、缩放因子 $F=0.5$ 、交叉概率 $CR=0.9$ 。利用差分进化算法在 Matlab 中求解。

5.1 算例结果及对比

经过差分进化算法求解，最优解趋于稳定，最后目标函数值最小时的最优预防性维护间隔和控制图参数结果如表 2 所示。

表 2 最优化参数结果
Tab.2 Optimal parameter results

参数	n	k	h/h	T/h	$E(C, T)$
结果	15	2.03	19.43	198.73	67.36

由表 2 的结果可以得知，预防性维护周期为

198.73 h，即控制图未监测出异常的维护时间间隔。系统运行 198.73 h 后，即使没有出现故障也要进行预防性维护，让设备恢复如新。每次控制图抽检样本量为 15 个，抽样间隔时间为 19.43 h，控制图的控制系数为 2.03。

为考虑结果的精确性，将相同的数据分别利用差分进化算法和传统的遗传算法进行计算，发现差分进化算法计算的结果有更好的收敛性，如图 4 所示；而遗传算法的结果容易陷入局部最优，如图 5 所示。图中，横坐标 g 为迭代次数，纵坐标为单位时间期望总费用。

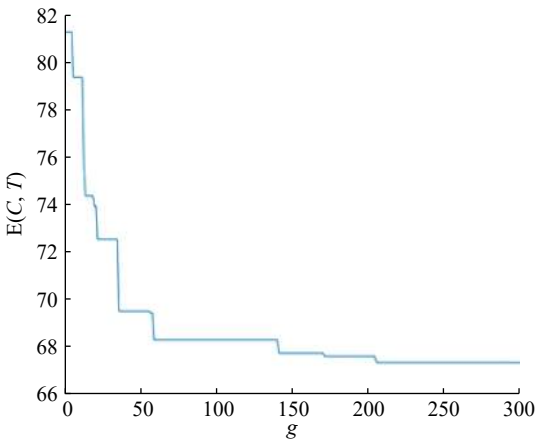


图 4 差分进化算法结果收敛图

Fig.4 Differential evolution algorithm results convergence graph

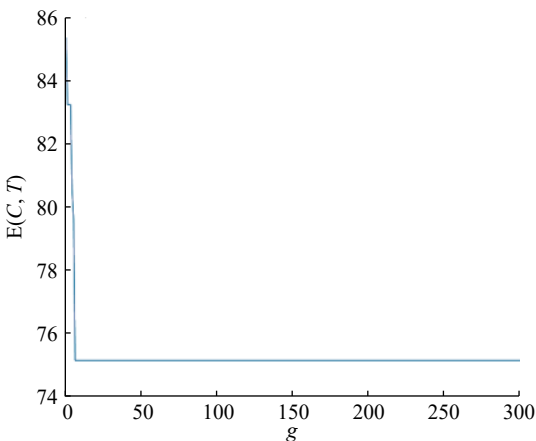


图 5 遗传算法结果收敛图

Fig.5 Genetic algorithm results convergence graph

5.2 灵敏度分析

为研究各参数对控制图参数 n ， h ， k 与预防维护时间 T 以及系统更新周期内的单位时间期望费用 $E(C, T)$ 的影响，对参数 δ ， c_1 ， c_2 ， c_q ， c_{11} ， c_{12} ， c_d ， c_s ， T_1 ， T_2 进行灵敏度分析。参数水平如表 3 所示，选用 $L_{16}(2^{10})$ 正交表得到的 16 次实验安

排如表 4 所示, 利用差分进化算法求解的结果记录在表 5 中。

表 3 参数水平
Tab.3 Parameters

类型	δ	c_1	c_2	c_q	c_{11}	c_{12}	c_d	c_s	T_1	T_2
水平1	1.2	800	1 500	25	20	45	800	25	1.5	3
水平2	1.5	1 000	2 000	40	30	65	1 200	40	2	6

表 4 实验安排
Tab.4 Experimental arrangement

序号	δ	c_1	c_2	c_q	c_{11}	c_{12}	c_d	c_s	T_1	T_2
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2
3	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1
4	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2
5	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2
6	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1
7	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2
8	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1
9	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1
10	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2
11	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1
12	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2
13	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2
14	2	2	1	1	2	2	1	2	1	1
15	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2
16	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1

表 5 实验计算结果
Tab.5 Experimental calculation results

序号	n	k	h/h	T/h	$E(C, T)$
1	15	2.03	19.43	198.73	67.36
2	17	2.01	15.82	230.67	75.39
3	14	2.03	18.53	199.84	100.64
4	16	2.01	19.82	241.19	102.21
5	17	2.01	19.69	222.23	89.35
6	13	2.17	19.14	217.87	95.27
7	15	2.01	18.79	205.78	82.80
8	14	2.02	18.82	207.95	81.27
9	11	2.01	19.99	237.73	60.29
10	12	2.02	17.64	249.04	63.93
11	11	2.01	17.01	231.91	72.35
12	14	2.01	19.24	233.63	74.46
13	11	2.02	17.61	199.67	82.91
14	11	2.01	17.76	238.49	82.02
15	11	2.01	19.62	199.51	69.89
16	10	2.01	17.87	240.13	70.90

根据 Matlab 得出的以上计算结果, 利用 Minitab 软件对响应变量 $E(C, T)$ 进行回归分析 ($\alpha=0.05$),得到的方差分析如表 6 所示, 系数显著性检验结果如表 7 所示。

表 6 回归方差分析
Tab.6 Regression analysis of variance

来源	自由度	SS	MS	F 值	P 值
因子	10	2 333.05	233.31	45.20	0.000
误差	5	25.81	5.16	—	—
合计	15	2 358.86	—	—	—

表 7 回归系数显著性检验
Tab.7 Regression coefficient significance test

变量	系数	系数标准误差	T 值	P 值
常量	52.3	10.6	4.93	0.004
δ	-48.97	3.79	-12.93	0.000
c_1	0.023 61	0.005 68	4.16	0.009
c_2	-0.007 90	0.002 27	-3.48	0.018
c_q	0.316 7	0.075 7	4.18	0.009
c_{11}	0.514	0.114	4.52	0.006
c_{12}	0.796 1	0.056 8	14.02	0.000
c_d	0.006 21	0.002 84	2.19	0.081
c_s	0.282 7	0.075 7	3.73	0.014
T_1	0.677	0.757	0.89	0.413
T_2	0.452	0.379	1.19	0.286

根据表 6 的方差分析结果可知, 其 P 值为 0, 说明建立的模型有效, 即存在参数对模型有显著影响。进一步由表 7 可知, δ 和 c_{12} 两个参数的 P 值是 0, 说明对 $E(T, C)$ 有十分显著的影响。其中, δ 表现为负面影响, c_{12} 表现为正面影响, 即 $E(C, T)$ 随着 δ 的增大而减小, 随着 c_{12} 的增大而增大。其次, c_1, c_2, c_q, c_{11} 和 c_s 的 P 值均在 (0,0.05) 区间内, 说明它们对 $E(C, T)$ 影响显著, 并且都表现为正影响。其余参数的 P 值都大于 0.05, 说明它们对 $E(C, T)$ 无显著影响。

通过灵敏度分析表明, 系统异常时的过程质量特性均值偏移量 δ 对单位时间期望总费用 $E(C, T)$ 具有十分显著的负向影响。这是由于均值偏移量 δ 越大, 控制图越容易监测出系统的异常状况, 从而减少系统失控运行的时间, 降低费用。在质量损失方面, 无论是受控时的单位损失费用 c_{11} , 还是失控时的单位损失费用 c_{12} , 都对 $E(C, T)$ 有显著的正向影响。另外, 样本抽样费用和单位缺货费用对 $E(C, T)$ 也有显著影响。因此, 在保证生产

质量和交货时间的前提下, 应注意优化设备的质量管理水平。

6 结 论

利用均值控制图对生产产品质量进行监控, 根据控制图以及预防性维护周期决定设备更新, 考虑控制图出现“误报警”和“漏报警”的可能性, 在单位时间期望总费用最小的前提下, 建立控制图与预防性维护的联合模型。利用差分进化算法进行求解, 通过实例分析验证了产品质量与预防性维护联合模型的可行性, 并且通过算法对比, 得出差分进化算法结果的准确性。通过灵敏度分析确定了对单位时间期望费用 $E(C, T)$ 具有显著影响的因素, 对指导企业优化经济指标具有参考价值。古典的维修模型多是根据时间来确定维修策略, 本文通过产品质量将设备状态联系起来, 建立联合维修策略, 为复杂设备的生产、维护和质量的结合提供一定的理论依据。但通过均值控制图只能片面地反映出生产设备的状态, 为了全面掌握产品质量与系统状态的联系, 可以结合方差等监控对象, 进一步深入研究。

参考文献:

- [1] CROSBY L B. The just-in-time manufacturing process: control of quality and quantity[J]. *Production and Inventory Management*, 1984, 25(4): 21–33.
- [2] 赵斐, 刘学娟. 含关键部件复杂系统的预防性维修策略优化模型[J]. *工业工程与管理*, 2016, 21(2): 100–107.
- [3] SHEU S H, GRIFFITH W S. Extended block replacement policy with shock models and used items[J]. *European Journal of Operational Research*, 2002, 140(1): 50–60.
- [4] BEN-DAYA M. The economic production lot-sizing problem with imperfect production processes and imperfect maintenance[J]. *International Journal of Production Economics*, 2002, 76(3): 257–264.
- [5] 王建民, 任良全, 张力, 等. MRO 支持技术研究[J]. *计算机集成制造系统*, 2010, 16(10): 2017–2025.
- [6] DHOUIB K, GHARBI A, BEN AZIZA M N. Joint optimal production control/preventive maintenance policy for imperfect process manufacturing cell[J]. *International Journal of Production Economics*, 2012, 137(1): 126–136.
- [7] 孙志礼, 王健, 印明昂, 等. 可修系统预防性维修时间的确定[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2014, 35(1): 84–87.
- [8] STOUMBOS Z G, REYNOLDS JR M R, RYAN T P, et al.

The state of statistical process control as we proceed into the 21st century[J]. *Journal of the American Statistical Association*, 2000, 95(451): 992–998.

- [9] BEN-DAYA M, RAHIM M A. Effect of maintenance on the economic design of x -control chart[J]. *European Journal of Operational Research*, 2000, 120: 131–143.
- [10] YIN H, ZHANG G J, ZHU H P, et al. An integrated model of statistical process control and maintenance based on the delayed monitoring[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2015, 133: 323–333.
- [11] DING S H, KAMARUDDIN S. Maintenance policy optimization-literature review and directions[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 76(5/8): 1263–1283.
- [12] BASRI E I, ABDUL RAZAK I H, AB-SAMAT H, et al. Preventive maintenance (PM) planning: a review[J]. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 2017, 23(2): 114–143.
- [13] 赵永强. 基于计数型控制图的设备预防维修控制[J]. *西安邮电大学学报*, 2014, 19(6): 92–95.
- [14] 张斌, 费文龙. $\bar{X}$ - R 图和预防性维修策略的优化设计[J]. *系统工程*, 2015, 33(5): 152–158.
- [15] 赵永强. 基于均值控制图的设备预防维修预警决策模型研究[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2018(11): 157–160.
- [16] 成国庆, 周炳海, 李玲. 多设备系统的生产批量、质量控制与预知维护联合优化[J]. *系统工程理论与实践*, 2019, 39(8): 2152–2161.
- [17] KHATAB A, DIALLO C, AGHEZZAF E H, et al. Integrated production quality and condition-based maintenance optimisation for a stochastically deteriorating manufacturing system[J]. *International Journal of Production Research*, 2019, 57(8): 2480–2497.
- [18] 周炳海, 刘自强. $\bar{X}$ - R 控制图的串行生产系统维护建模方法[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2019, 40(9): 1616–1621.
- [19] PASHA M A, BAMENI MOGHADAM M. A generalized version of Ben-Daya-Rahim (2000) and Rahim-Banerjee (1993) cost models in economic design of X -control charts for systems with early replacement and preventive maintenance under decreasing integrated hazard[J]. *Communications in Statistics-Simulation and Computation*, 2020, 49(1): 178–193.
- [20] 李春发, 李豫姣, 高华. 不完美检测下的控制图与预防性维修联合设计[J]. *工业工程与管理*, 2017, 22(4): 85–90, 114.
- [21] NERI F, TIRRONEN V. Recent advances in differential evolution: a survey and experimental analysis[J]. *Artificial Intelligence Review*, 2010, 33(1/2): 61–106.