

文章编号:1006-2467(2020)11-1182-07

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2019.183

# 基于产品使用率的柔性基本质保策略优化设计

苏 春, 赵家彬

(东南大学 机械工程学院, 南京 211189)

**摘 要:** 以制造商质保成本最小化为目标,考虑使用时间和使用量相关性对产品故障率的影响,利用 Copula 函数建立二维基本质保优化模型. 在质保期内采用最小维修和非等强度周期预防性维修,优化基本质保期内产品的维修策略. 通过分析基本质保期和价格对产品销量的影响,建立产品利润模型. 考虑制造商提供标准质保和柔性质保等两种基本质保策略,分别优化基本质保期的长度和价格. 案例研究表明:质保成本最小化并不能保证制造商获得最大利润;而增加质保策略的柔性,可以帮助制造商提升顾客满意度、获取更高的利润.

**关键词:** 柔性基本质保; Copula 函数; 质保成本; 预防性维修; 使用率

**中图分类号:** TH 17 **文献标志码:** A

## Optimal Design for Flexible Basic Warranty Policies Based on Usage Rate of Products

SU Chun, ZHAO Jiabin

(School of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

**Abstract:** To minimize the warranty cost of manufacturers, a two-dimensional basic warranty optimization model is established based on Copula function. The influence of usage time and usage rate on product failure rate is considered. Moreover, minimal repair and non-equal-strength periodic preventive maintenances are adopted, and the maintenance policies during the warranty period are optimized. By considering the influence of basic warranty period and sale price on product sales, a profit model is established. Considering that manufacturers provide two types of warranty policies, i. e. normative warranty policy and flexible warranty policy, for customers, the basic warranty period and its prices are optimized respectively. The result shows that minimizing warranty cost cannot ensure the maximization of manufacturers' benefits. However, by increasing the flexibility of warranty policy, customer satisfaction can be promoted, which helps to gain more profits for manufacturers.

**Key words:** flexible basic warranty; Copula function; warranty cost; preventive maintenance; usage rate

质保是指制造商对所售产品在一定期限和条件下,因自身质量引起的缺陷或故障现象,向顾客提供的维修、更换、退赔等承诺<sup>[1]</sup>. 对顾客来说,质保可以

避免在一定期限内因产品故障或未达到预期性能而导致的损失. 同时,质保合同也明确了制造商应承担的有限责任,可以避免因顾客不合理的质保索赔而

收稿日期:2019-06-27

基金项目:江苏风力发电工程技术中心开放基金(ZK19-03-03),国家自然科学基金(71671035)资助项目

作者简介:苏 春(1970-),男,安徽省滁州市人,教授,博士生导师,研究方向为可靠性工程、生产系统工程.

电话(Tel.):13851875437; E-mail: suchun@seu.edu.cn.

造成不必要的利益损害。

基本质保费用通常包含在产品售价中。质保条款设计与产品质量、售价以及制造商的预期利润等因素相关,科学的质保策略应有利于制造商和顾客的双赢。Yeh 等<sup>[2]</sup>对质保期内的产品采用预防性维修,提出涵盖可靠性、生产能力、质保期和价格的集成优化模型。Park 等<sup>[3]</sup>提出一种可修产品的质保成本模型,同时实施可更新最小维修-替换质保和役龄替换策略,扩展了役龄替换策略。Xie 等<sup>[4]</sup>考虑产品销售过程的随机性,构建期望折扣质保成本及其方差模型,计算给定周期内累计的折扣质保成本。上述研究均针对一维质保展开,并以产品使用时间的单一维度来定义质保。对于风力机、工程机械等产品,质保条款不仅要考虑使用时间,还应考虑使用量等因素,此即二维质保或多维质保。

制造商为顾客提供维修、更换等质保服务会产生一定的服务成本。维修策略不同,维修和质保成本会存在较大的差异。Shafiee 等<sup>[5]</sup>将质保决策中的维修模型分为仅考虑事后维修、同时考虑事后维修和预防性维修、质保期结束后的维修 3 种类型。Wu 等<sup>[6]</sup>将预防性维修模型分为线性、非线性、兼有线性和非线性 3 种类型。Huang 等<sup>[7]</sup>以顾客使用率为基础,通过优化预防性维修周期来降低质保成本。Su 等<sup>[1]</sup>以役龄回退因子表征预防性维修强度,优化预防性维修的周期和强度,分阶段优化质保成本。Pan 等<sup>[8]</sup>考虑改进因子与预防性维修成本、系统使用年限和学习效应之间的关系,以长期平均成本率最小为目标优化预防性维修策略。现有的质保合同及其维修策略大多是刚性的,制造商为顾客提供相同的质保合同条款,未考虑顾客个性化需求和产品使用情况的差异性。此外,故障建模很少考虑产品使用时间与使用量之间的相关性。

Moskowitz 等<sup>[9]</sup>率先提出柔性二维质保概念,制造商以相同的质保成本为顾客提供差异化的质保区间。Wang 等<sup>[10]</sup>分别从制造商和顾客的角度,研究二维质保政策下的最优预防性维修策略。Shah-anaghi 等<sup>[11]</sup>采用回归方法拟合质保成本与质保期之间的函数关系,获得柔性质保区间。Su 等<sup>[12]</sup>以二手产品为研究对象,分析质量升级等可靠性增长措施对二手产品质保成本的影响,构建柔性的质量升级策略和二维质保合同。目前,尚未见到面向二维基本质保的柔性质保策略和价格设计的研究工作。

本文研究二维柔性基本质保策略的设计问题,采用 Copula 函数描述产品使用时间和使用量之间的相关性,建立故障和非等强度的预防性维修模型;

以利润最大化为目标,分别建立产品销量和利润模型;考虑产品使用率分布,求解利润优化模型,优化基本质保期长度、维修策略和质保成本,获得产品标准的基本质保策略。在此基础上,以保证不同使用率的顾客均能享受合理的质保服务为目标,在质保成本相同的前提下设计柔性基本质保策略,为不同使用率的顾客制定具有价格差异的柔性质保策略。

# 1 模型构建

## 1.1 质保成本模型

以  $W(T, X)$  表示产品二维矩形基本质保区间,  $T$ 、 $X$  分别为产品基本质保期使用时间和使用量的上限,  $T > 0, X > 0$ 。当使用时间或使用量中的任意一个指标达到其上限时,基本质保期结束。以  $r$  表示产品的实际使用率,设  $r_0$  为使用率的参照基准 ( $r_0 = X/T$ ),则基本质保期的结束时间可以表示为

$$W = \begin{cases} T, & r \leq r_0 \\ X/r, & r > r_0 \end{cases} \quad (1)$$

在质保期内,产品若发生故障将会产生维修、更换、维修人员差旅以及人工等成本,则质保成本为上述成本之和。考虑到差旅以及人工等费用易于统计分析,本研究主要关注维修成本及更换成本。

机电产品的故障率可以用浴盆曲线来描述。经过出厂前老化测试等过程后,在有效寿命期,产品的故障率趋于稳定。在二维质保故障建模中,产品使用时间、使用量等参数可以表示为时间的函数。设  $F_1(t)$ 、 $F_2(x)$  分别为  $T$  和  $X$  的累积分布函数,利用 Copula 函数可以构造二维联合分布函数,  $F(t, x) = \text{Copula}(F_1(t), F_2(x); \theta)$ ,其中  $\theta$  为 Copula 函数的相关系数,其概率密度函数  $f(t, x)$  和故障率函数  $h(t, x)$  分别为

$$f(t, x) = \frac{\partial^2 F(t, x)}{\partial t \partial x} \quad (2)$$

$$h(t, x) = \frac{f(t, x)}{1 - F(t, x)} \quad (3)$$

在 Copula 函数族中,Clayton Copula 函数可以描述正相关关系以及解释尾部相关对可靠性的影响,适用于系统可靠性建模<sup>[13]</sup>。将不同样本在同一时刻的性能退化数据视为服从某一分布的随机变量,建立故障模型。该方法关注产品的总体属性,适用于退化趋势不明显的情况。设  $T$ 、 $X$  分别服从尺度参数为  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$ 、形状参数为  $\beta_1$  和  $\beta_2$  的两参数 Weibull 分布,构造 Clayton Copula 函数,则联合概率分布函数为

$$F(t, x) = 1 - \{\exp[\theta(t/\alpha_1)^{\beta_1}]\} +$$

$$\exp[\theta(x/\alpha_2)^{\beta_2}] - 1\}^{-1/\theta} \quad (4)$$

式中： $\alpha_1 > 0, \alpha_2 > 0, \beta_1 > 1, \beta_2 > 1, \theta \in (0, +\infty)$ . 变量  $T$  和  $X$  之间的相关系数为  $\tau = \theta/(2 + \theta)$ ,  $\theta$  越大则相关度越高.

若直接对式(4)求二阶偏导以获得故障率的函数表达式,模型将变得十分复杂.采用边缘法,将使用量转化为产品年龄和使用率的函数,并假定同一顾客在质保期内的使用率保持不变<sup>[14]</sup>.假设  $T(t)$ 、 $X(t)$  分别表示在  $t$  时刻产品的累积使用时间和累积使用量.为简化模型,假设相对于正常工作时间,产品故障后的维修时间可以忽略,则有  $T(t) = t$ ,  $X(t) = rt$ .那么概率分布函数为

$$F(t \mid r) = 1 - \{\exp[\theta(t/\alpha_1)^{\beta_1}] + \exp[\theta(rt/\alpha_2)^{\beta_2}] - 1\}^{-1/\theta} \quad (5)$$

则其概率密度函数和故障率函数分别为

$$f(t \mid r) = \left\{ \exp\left[\theta\left(\frac{t}{\alpha_1}\right)^{\beta_1}\right] + \exp\left[\theta\left(\frac{rt}{\alpha_2}\right)^{\beta_2}\right] - 1 \right\}^{-\frac{1}{\theta}-1} \left\{ \frac{\beta_1}{\alpha_1} \left(\frac{t}{\alpha_1}\right)^{\beta_1-1} \exp\left[\theta\left(\frac{t}{\alpha_1}\right)^{\beta_1}\right] + \frac{\beta_2 r}{\alpha_2} \left(\frac{rt}{\alpha_2}\right)^{\beta_2-1} \exp\left[\theta\left(\frac{rt}{\alpha_2}\right)^{\beta_2}\right] \right\} \quad (6)$$

$$h(t \mid r) = \left\{ \exp\left[\theta\left(\frac{t}{\alpha_1}\right)^{\beta_1}\right] + \exp\left[\theta\left(\frac{rt}{\alpha_2}\right)^{\beta_2}\right] - 1 \right\}^{-1} \left\{ \frac{\beta_1}{\alpha_1} \left(\frac{t}{\alpha_1}\right)^{\beta_1-1} \exp\left[\theta\left(\frac{t}{\alpha_1}\right)^{\beta_1}\right] + \frac{\beta_2 r}{\alpha_2} \left(\frac{rt}{\alpha_2}\right)^{\beta_2-1} \exp\left[\theta\left(\frac{rt}{\alpha_2}\right)^{\beta_2}\right] \right\} \quad (7)$$

在质保期内,若产品发生故障均采用事后最小维修加以修复.为了减小故障次数以及维修成本,对产品采取周期预防性维修.采用役龄回退因子  $\delta(m)$  描述预防性维修效果,  $\delta(m) = (1 + m)e^{-m}, 0 \leq m \leq M$ .其中: $m$  为预防性维修强度; $M$  为预防性维修强度的上限(阈值).当  $m = 0$  时,  $\delta(m) = 1$ ,无役龄回退,相当于取消此次预防性维修;当  $m = M$  时,  $\delta(m) = 0$ ,役龄回退到上一次预防性维修结束时的水平.  $m = M$  相当于修旧如新,即更换部件或产品.当剩余质保期小于或等于预防性维修周期时,将不再执行预防性维修.令质保期内预防性维修间隔为  $I$ ,总的维修次数为  $n$ ,则每次预防性维修后的产品实际役龄为

$$\begin{aligned} \nu_1 &= \nu_0 + I\delta(m_1) \\ \nu_2 &= \nu_1 + I\delta(m_2) \\ &\vdots \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \nu_i &= \nu_{i-1} + I\delta(m_i) \\ &\vdots \\ \nu_n &= \nu_{n-1} + I\delta(m_n) \end{aligned}$$

其中： $\nu_0 = 0$  为初始役龄; $I = \min\{K, L/r\}$ ,  $K$ 、 $L$  分别为使用时间和使用量维度的预防性维修间隔; $\nu_n$  为第  $n$  次预防性维修后产品的实际役龄.每一次预防性维修的强度  $m_i (i = 1, 2, \cdots, n)$  均不相同,以增加维修策略的柔性.

对两次预防性维修之间发生的故障开展最小维修,且维修时间忽略不计,则产品故障服从非齐次泊松过程(NHPP),并且其条件故障强度等于首次故障时间的条件故障率(见式(7)).因此,需要单独估计每两次预防性维修之间的故障次数,基本质保期内预期故障次数为

$$N = \sum_{i=1}^n \int_{\nu_{i-1}}^{\nu_{i-1}+K} h(t \mid r) dt + \int_{\nu_n}^{\nu_n+W-nK} h(t \mid r) dt \quad (8)$$

假设每一次最小维修成本为  $C_r$ 、预防性维修成本为  $C_{pm}^m$ ,包括维修人员、运输以及备件等成本,则基本质保期内质保成本的期望值为

$$C_w = NC_r + \sum_{i=0}^n C_{pm}^{m_i} \quad (9)$$

1.2 销量模型

文献[15]采用对数线性函数构造销量随产品价格和质保期变动的模型.上述模型存在如下缺陷:① 仅考虑产品价格和质保期变动的影响,未考虑市场波动和随机性,适用于垄断性产品;② 仅考虑质保期对销量的影响,未考虑质保期长度与产品质量的相关性,忽略了使用过程中顾客满意度对产品销量的影响.

设市场同类竞争产品的平均价格为  $P_0$ ,基本质保期为  $W_0(T_0, X_0)$ ,  $T_0$ 、 $X_0$  分别为同类产品基本质保期的平均使用时间和使用量;质保期内的故障次数和预防性维修次数分别为  $N_0$ 、 $n_0$ ,其对应的市场销量为  $D_0$ .质保期内的故障次数反应了产品质量,频繁地维修会导致顾客满意度和对产品的信任度降低.以质保期内单位时间的维修次数来表征顾客满意度.综合考虑制造商产品价格、质保期以及顾客满意度对销量的影响,获得的产品销量模型为

$$D = D_0 \left(\frac{P}{P_0}\right)^{-b_1} \left(\frac{W}{W_0}\right)^{b_2} \left[\frac{W_0(N+n)}{W(N_0+n_0)}\right]^{-b_3} \quad (10)$$

式中： $P$  为产品价格; $b_1$ 、 $b_2$  和  $b_3$  分别为价格、基本质保期和顾客满意度的弹性因子,且  $b_1 > 1, 0 < b_2 < 1, 0 < b_3 < 1$ ;  $W$ 、 $N$  和  $n$  均大于 0.

1.3 利润优化模型

制造商的利润取决于产品销量、价格以及质保

成本等因素. 现有的质保研究常以质保成本最小化来优化维修策略,忽略了产品价格和基本质保期的优化. 以制造商利润最大化为目标,关注二维柔性基本质保期  $W(T, X)$ 、质保价格  $P_w$  设计以及质保期内维修策略的优化. 设产品生产成本为  $C_M$ 、不包含基本质保时产品的价格为  $P_p$ ,获得制造商利润  $R$  的优化模型如下:

$$\max R = D(P_p + P_w - C_M - C_w) \tag{11}$$

## 2 基本质保策略设计

针对不同顾客,产品使用率常存在明显差异,由此导致产品故障率、维修策略、质保成本以及有效质保区间都将存在较大差别. 将  $r$  代入式(11) 进行求解可以优化基本质保区间、定价和维修策略. 但该方法难以优化各种使用率情况下的质保策略和价格. 设使用率的累积分布函数为  $G(r)$ ,  $g(r)$  为该使用率的概率密度函数,且  $r_1 \leq r \leq r_h$ ,  $r_1$ 、 $r_h$  分别为产品使用率的下限和上限. 通过优化预防性维修周期( $K$ ,  $L$ )、维修强度  $m_i$ 、基本质保期  $W^*(T^*, X^*)$  以及定价  $P_w^*$  (上标  $*$  表示各变量的优化解) 实现顾客群体总期望利润的最大化,目标函数为

$$\begin{aligned} \max R = & \int_{r_1}^{r_0} [D(P_p + P_w - C_M - C_w)] dG(r) + \\ & \int_{r_0}^{r_h} [D(P_p + P_w - C_M - C_w)] dG(r) \tag{12} \end{aligned}$$

通过求解式(12),可获得标准的二维基本质保期及其定价策略. 刚性的质保策略难以实现对所有顾客的公平性. 实际上,只有当  $r = r_0$  时,基本质保期才会在点( $T^*$ ,  $X^*$ ) 结束. 当  $r > r_0$  或  $r < r_0$  时,基本质保期均会在点( $T^*$ ,  $X^*$ ) 之前结束. 因此,多数顾客付出相同的质保成本,实际获得的质保回报都低于  $C_w^*$ . 显然,这样的质保策略是不公平的.

制造商通常会对产品实施统一定价. 保持质保成本、价格和维修策略不变,优化不同使用率下等成本和价格的二维柔性质保区间. 设在第  $n$  次到第  $n + 1$  次预防性维修期间,质保成本为  $C_w^*$ , 则

$$\begin{aligned} C_w^* = C_r & \left( \sum_{i=1}^n \int_{\nu_{i-1}}^{\nu_{i-1}+K} h(t | r) dt + \right. \\ & \left. \int_{\nu_n}^T h(t | r) dt \right) + \sum_{i=0}^n C_{pm}^{m_i} \tag{13} \end{aligned}$$

对于使用率为  $r$  的顾客,二维基本质保区间为

$$\left. \begin{aligned} T^* &= T + nK - \nu_n \\ X^* &= T^* r \end{aligned} \right\} \tag{14}$$

其中存在一种特殊情况:在第  $n$  次预防性维修时,质保成本  $C$  瞬间超过  $C^*$ , 即  $C < C_w^* < C + C_{pm}^{m_i}$ . 则二维基本质保区间为

$$\left. \begin{aligned} T^* &= nK \\ X^* &= Tr \end{aligned} \right\} \tag{15}$$

按等间距在  $(r_1, r_h)$  范围内取得  $y$  个点  $r_1, r_2, \dots, r_j, \dots, r_y$ . 求解式(12),可以得到  $y + 1$  个组合  $(T_j, X_j)$ ,通过拟合可以获得等价格基本质保的柔性曲线. 当允许对产品实施差异化定价时,利用相同的求解方法,制造商可以根据顾客使用率的不同得到  $(T, X, P, K, L, m_i)$  的柔性基本质保菜单.

## 3 案例分析

设某车型平均参考售价  $P_0$  为 5 万元,其中不包含质保成本的售价为 4.6 万元,制造成本  $C_M$  为 4 万元. 基本质保参考值为  $W_0 = (3 \text{ a}, 6 \times 10^4 \text{ km})$ . 设定故障强度模型中  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  分别为 4 和 3,  $\beta_1$ 、 $\beta_2$  均为 3,  $\theta = 0.7$ . 销量模型中,市场参考销量为 3 万辆,价格弹性因子  $b_1 = 7$ ,质保期弹性因子  $b_2 = 0.6$ ,顾客满意度弹性因子  $b_3 = 0.3$ ;维修强度  $m = 0, 1, \dots, 5$ ,对应的预防性维修成本分别为  $C_p = 0, 20, 60, 140, 300$  和 620 元;事后最小维修平均成本为  $C_f = 250$  元. 设顾客使用率分布服从  $[0.5 \times 10^4, 3.5 \times 10^4]$  km/a 的平均分布,其中  $r_1 = 0.5 \times 10^4$  km/a,  $r_h = 3.5 \times 10^4$  km/a,  $r_0 = 2 \times 10^4$  km/a.

### 3.1 基本质保策略设计

本文重点研究基本质保期及其价格设计对制造商利润的影响,保持基本质保期和质保价格不变,在各预防性维修周期强度相同的条件下优化维修策略. 不同维修优化策略的结果如表 1 所示. 由表 1 可知,若不采取预防性维修,只采取事后最小维修,制造商的质保成本最高,且利润最低. 显然,若以质保成本最小化为目标来优化维修策略,将无法实现制造商利润的最大化. 其原因为在该策略下,产品故障和维修次数较多,销量和盈利水平下降. 当  $m = 4$ 、 $K = 12 \text{ m}$  时,不同使用率顾客的  $C_w = 1\,361.34$  元,高于质保成本最小化的 1 125.06 元,此时制造商可获得最大利润,即 30 125.00 万元,高于 29 292.76 万元. 在后续基本质保期和质保价格设计时,将保持该维修策略不变.

表 1 不同维修优化策略的结果

Tab. 1 Results of different maintenance optimization strategies

维修策略	$m$	$K/\text{m}$	$L \times 10^{-4}/\text{km}$	$C_w/\text{万元}$	$R/\text{万元}$
最小性维修				2 000.45	23 998.64
质保成本最小化	3	12	24	1 125.06	29 292.76
利润最大化	4	12	24	1 361.34	30 125.00

考虑顾客的使用率分布,利用式(11)求解,获得当制造商利润最大时,质保成本、质保定价随基本质保期的变化规律,如图 1 所示.由图 1 可知,产品制造成本及其定价均随着基本质保期的增加而增加,但价格增长速度要高于成本增长速度.因此,设定的质保期越长,单位产品给制造商带来的利润更高.由于制造商提供的质保服务通常为有限的时间段,还应该考虑单位产品在单位时间内的获利能力.

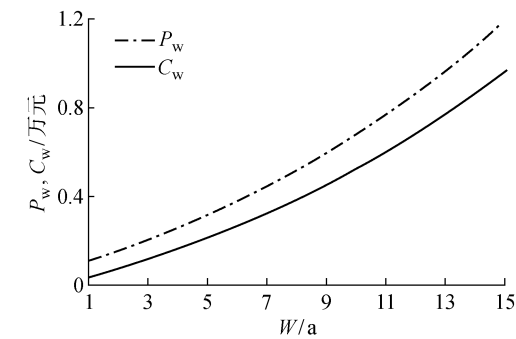


图 1 不同基本质保期下,质保价格和质保成本的演变规律

Fig. 1 Changes of warranty prices and warranty costs in different warranty periods

以制造商利润最大化为目标,分析产品销量、利润随基本质保期的变动规律,如图 2 所示.保持维修策略不变,随着质保期的延长,单位时间内的维修次数将增加,产品价格也将随之增加.此外,质保期与销量呈正相关关系,前期销量随质保期的增加呈增长趋势,并在第 6 年取得最大值 5.47 万辆;之后销量开始下降,制造商利润也呈先增大后减小的趋势,利润在第 6 年和第 7 年之间取得最大值.对产品在 整个质保期内的盈利能力取均值,制造商单位时间内的盈利能力随质保期的增长呈递减趋势.当质保期为 1 a 时,单位时间内制造商利润将取得最大值.若以总利润最大为优化目标,在质保期内取其离散

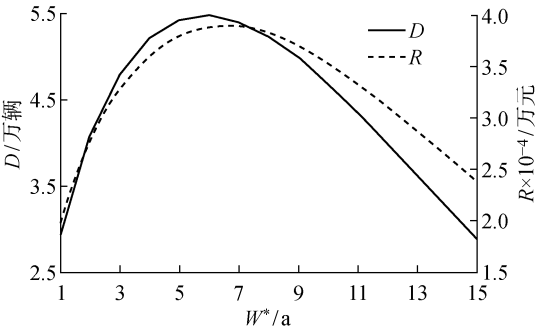


图 2 产品销量、利润与基本质保期的关系

Fig. 2 Sales volume and profit versus basic warranty period

整数值,当基本质保期  $W^*=(7\text{ a}, 14\times 10^4\text{ km})$ 、质保定价  $P_w^*=3\,763\text{ 元}$  时,质保成本为 2 654.10 元,制造商的利润最高,为  $3.89\times 10^4$  万元.

保持式(11)优化结果中的质保定价及成本不变,考虑顾客使用率的差异性,优化基本质保区间,结果如图 3 所示.由图 3 可知,顾客使用率越高,对应质保区间的使用量越高、使用时间越短、质保期越短;而随着产品使用率的降低,质保期长度将增加.此外,在不同使用率区间,使用量也呈现出不同的变化规律.

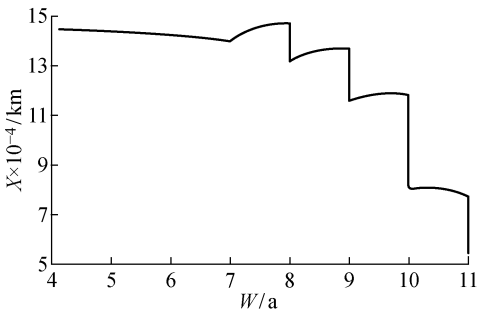


图 3 相同定价下柔性基本质保区间优化结果

Fig. 3 Flexible intervals of basic warranty at the same price

对不同使用率的顾客提供差别化的质保和定价策略.以 6 个使用率区间为例进行分析,结果如表 2 所示.考虑到实际需求,以月为单位、对基本质保区间时间进行离散化.随着使用率的增加,基本质保策略的质保区间长度减小、质保定价降低.制造商对不同使用率的顾客制定不同的基本质保优化策略.产品使用率越高的顾客群体,制造商获得的利润越低.在该策略下,制造商可获得的期望利润为  $4.07\times 10^4$  万元,大于前两种策略的收益.

表 2 差别定价柔性基本质保分析

Tab. 2 Analysis of flexible basic warranty at differentiated prices

$r\times 10^{-4}/(\text{km}\cdot\text{a}^{-1})$	$P_w/\text{元}$	$T/\text{m}$	$X\times 10^{-4}/\text{km}$	$R/\text{万元}$
0.5~1.0	4 532	131	8.19	58 056.16
1.0~1.5	4 166	107	11.15	51 756.35
1.5~2.0	3 868	83	12.10	43 477.46
2.0~2.5	3 650	63	11.81	35 435.96
2.5~3.0	3 664	52	11.92	29 721.69
3.0~3.5	3 658	44	11.92	25 608.95

3.2 参数灵敏度分析

模型参数对优化结果有重要的影响.针对模型中基本质保参考值、价格弹性因子、质保期弹性因子

和顾客满意度弹性因子 4 个参数开展灵敏度分析. 保持其他参数不变,改变某一参数的取值,获得优化结果的变化规律,分析参数不确定性对优化结果的影响.

当预防性维修强度为  $m=4$ 、周期为  $K=12$  m 时,改变  $W_0$ ,产品销量和制造商利润的变化规律如图 4 所示.在上述条件下,基本质保策略完全相同,而销量和利润发生改变.其中, $P_w^*=4\,459$  元, $C_w^*=3\,250.25$  元, $W_0^*$  为(7 a,  $14\times 10^4$  km).此外,产品销量和总利润呈现递减趋势,且减小速率逐渐减缓.当基本质保期大于 4 a 后,产品销量和制造商利润分别保持在 5.40 万辆和  $3.89\times 10^4$  万元,不再发生变化.因此,若基本质保期参考值较小,制造商优化基本质保策略的价值较大;反之,若基本质保期已经较长,则制造商很难通过提供更具吸引力的基本质保策略获取更大的收益.

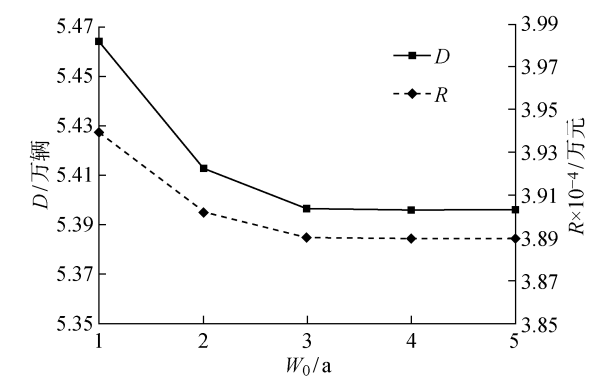


图 4 基本质保期的灵敏度分析

Fig. 4 Sensitivity analysis of basic warranty length

保持其他参数和维修策略不变,只改变价格弹性因子  $b_1$ ,获得的基本质保策略如表 3 所示.价格弹性因子越大,表示价格对产品销量的影响越大,不利于单位产品获得更高的利润.此时,制造商可以通过降低价格、增加销量的方式,获取更多的利润.由表 3 可知,基本质保期、成本以及质保定价均随价格弹性因子的增大而减小,单位产品利润不断减小,产品

表 3 价格弹性因子的灵敏度分析

Tab. 3 Sensitivity analysis of price elastic factor

$b_1$	$W/a$	$C_w/\text{元}$	$P_w/\text{元}$	$D/\text{万辆}$	$R \times 10^{-4}/\text{万元}$
3	9	4 525.91	12 000	4.17	5.62
5	8	3 864.13	8 830	3.88	4.25
7	7	3 250.25	4 459	5.40	3.89
9	5	2 152.34	2 153	6.77	4.06
11	5	2 152.34	2 153	7.30	4.38

销量呈现出先减小后增大的趋势.此时,制造商总利润的变化规律与销量保持一致,但其最小值对应的价格弹性因子更大.

保持其他参数和条件不变,改变质保期弹性因子  $b_2$  的大小,获得的基本质保策略如表 4 所示.基本质保期弹性因子越大,表示基本质保期对产品销量的促进作用越大.由表 4 可知,该因子越大,基本质保策略中的质保期越长,成本和定价也会随之增加.随着该因子的增加,优化后的基本质保期、成本、定价以及单位产品利润均呈增加趋势.当该因子小于 0.2 时,价格上涨对销量的抑制作用大于质保期延长对销量的促进作用;当该因子大于 0.2 时,质保期延长对销量的促进作用大于价格上涨对销量的抑制作用.产品销量随基本质保期的增加,呈现先减小后增加的趋势.当基本质保期弹性因子为 0.2 时,利润与销量同时达到最小值,分别为  $3.29\times 10^4$  万元和 4.79 万辆.

表 4 基本质保期弹性因子灵敏度分析

Tab. 4 Sensitivity analysis of basic warranty length elastic factor

$b_2$	$W/a$	$C_w/\text{元}$	$P_w/\text{元}$	$D/\text{万辆}$	$R \times 10^{-4}/\text{万元}$
0	1	377.25	1 107	5.64	3.79
0.2	3	1 024.23	2 072	4.79	3.29
0.4	5	2 152.34	3 178	4.89	3.44
0.6	7	3 250.25	4 459	5.40	3.89
0.8	8	3 864.13	5 175	6.36	4.65
1.0	9	4 525.91	5 947	7.74	5.74

保持其他条件不变,只改变顾客满意度弹性因子  $b_3$ ,基本质保策略如表 5 所示.顾客满意度弹性因子越大,表示制造商需要通过调整维修策略尽可能降低质保期内的维修次数.由表 5 可知, $b_3$  越大,优化后的质保期越短,质保成本及其定价也随之减小.与其他两个弹性因子不同的是,产品销量与总利润

表 5 顾客满意度弹性因子灵敏度分析

Tab. 5 Sensitivity analysis of customer satisfaction elastic factor

$b_3$	$W/a$	$C_w/\text{元}$	$P_w/\text{元}$	$D/\text{万辆}$	$R \times 10^{-4}/\text{万元}$
0.1	7	3 250.25	4 459	4.91	3.54
0.3	7	3 250.25	4 459	5.40	3.89
0.5	6	2 680.81	3 794	6.07	4.32
0.7	6	2 680.81	3 794	6.73	4.79
0.9	5	2 152.34	3 178	7.58	5.33

呈现出增加的趋势. 因此, 当顾客满意度弹性因子较大时, 制造商应适当缩减质保期, 避免因质保期内维修次数过多对企业形象造成负面影响.

## 4 结语

考虑使用时间和使用量等二维变量的相关性, 建立了质保成本优化模型, 构建涵盖质保期、价格以及顾客满意度的销量模型; 以制造商利润最大化为目标, 优化基本质保策略. 基于顾客使用率, 提供3种定制化的基本质保策略, 包括基本质保区间、维修策略和质保价格. 研究表明: 能实现质保成本最小的维修策略并不一定能够保证制造商利润的最大化; 根据顾客使用率的差异, 提供高柔性的定制化基本质保策略, 可以在提高顾客满意度的同时, 增加制造商利润, 实现制造商与顾客的双赢.

在客户定制质保模型中, 仍有一些问题值得进一步探索: ① 综合考虑产品使用率和顾客风险偏好, 提供多种基本质保策略供选择; ② 维修策略中可考虑不定周期、不定强度的预防性维修, 以提升质保策略柔性; ③ 制造商对定制化产品提供柔性基本质保, 根据顾客选择, 柔性地设计质保服务合同.

## 参考文献:

- [1] SU C, WANG X L. A two-stage preventive maintenance optimization model incorporating two-dimensional extended warranty[J]. **Reliability Engineering & System Safety**, 2016, 155: 169-178.
- [2] YE H C W, FANG C C. Optimal decision for warranty with consideration of marketing and production capacity[J]. **International Journal of Production Research**, 2015, 53(18): 5456-5471.
- [3] PARK M, JUNG K M, PARK D H. A generalized age replacement policy for systems under renewing repair-replacement warranty[J]. **IEEE Transactions on Reliability**, 2016, 65(2): 604-612.
- [4] XIE W, YE Z S. Aggregate discounted warranty cost forecast for a new product considering stochastic sales[J]. **IEEE Transactions on Reliability**, 2016, 65(1): 486-497.
- [5] SHAFIEE M, CHUKOVA S. Maintenance models in warranty: A literature review[J]. **European Jour-**

- nal of Operational Research**, 2013, 229(3): 561-572.
- [6] WU S M, ZUO M J. Linear and nonlinear preventive maintenance models[J]. **IEEE Transactions on Reliability**, 2010, 59(1): 242-249.
- [7] HUANG Y S, HUANG C D, HO J W. A customized two-dimensional extended warranty with preventive maintenance[J]. **European Journal of Operational Research**, 2017, 257(3): 971-978.
- [8] PAN E S, LIAO W Z, ZHUO M L. Periodic preventive maintenance policy with infinite time and limit of reliability based on health index[J]. **Journal of Shanghai Jiao Tong University (Science)**, 2010, 15(2): 231-235.
- [9] MOSKOWITZ H, CHUN Y H. A poisson regression model for two-attribute warranty policies[J]. **Naval Research Logistics**, 1994, 41(3): 355-376.
- [10] WANG J T, ZHOU Z, PENG H. Flexible decision models for a two-dimensional warranty policy with periodic preventive maintenance[J]. **Reliability Engineering & System Safety**, 2017, 162: 14-27.
- [11] SHAHANAGHI K, NOOROSSANA R, JALALI-NAINI S G, *et al.* Failure modeling and optimizing preventive maintenance strategy during two-dimensional extended warranty contracts[J]. **Engineering Failure Analysis**, 2013, 28: 90-102.
- [12] SU C, WANG X L. Modeling flexible two-dimensional warranty contracts for used products considering reliability improvement actions[J]. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability**, 2016, 230(2): 237-247.
- [13] TANG X S, LI D Q, ZHOU C B, *et al.* Impact of copulas for modeling bivariate distributions on system reliability[J]. **Structural Safety**, 2013, 44: 80-90.
- [14] JACK N, ISKANDAR B P, MURTHY D N P. A repair-replace strategy based on usage rate for items sold with a two-dimensional warranty[J]. **Reliability Engineering & System Safety**, 2009, 94(2): 611-617.
- [15] HE S G, ZHANG Z M, ZHANG G H, *et al.* Two-dimensional base warranty design based on a new demand function considering heterogeneous usage rate[J]. **International Journal of Production Research**, 2017, 55(23): 7058-7072.

(本文编辑: 石易文)