

考虑预防性维修的柔性二维延长质保定价策略研究

张晓磊, 苏春

(东南大学 机械工程学院, 江苏 南京 211189)

摘要:针对延长质保合同交易的不确定性,结合产品的性能退化规律,提出了考虑不完全预防性维修的二维延长质保定价模型。同时考虑时间间隔和使用度间隔对产品实施二维预防性维修措施,采用虚拟年龄法描述预防性维修的实施效果。分别从制造商和顾客的角度完成延长质保成本建模,在不同的预防性维修方案下,采用网格搜索法优化预防性维修策略以及延长质保价格,根据顾客使用率的差异性提出定制化延长质保定价方案。案例研究表明:根据使用率不同,通过为顾客提供定制化的延保价格和维修策略,有助于制造商利益的最大化;在整个质保期内实施预防性维修措施,可以有效减少双方的质保费用。

关键词:延长质保;二维预防性维修;使用率;定制化质保策略;柔性定价

中图分类号:TH17 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-2758(2019)02-0393-08

随着经济全球化的推进,制造商的业务重点开始从单纯的销售产品,向营销产品与售后服务并重的模式转变^[1]。作为产品售后的重要组成部分,质保服务可以帮助企业博取顾客信赖、赢得市场。质保是制造商对产品发生的特定故障现象,向顾客提供更换、维修等服务的契约^[2]。根据定义质保界限的变量数量,质保可以分为一维质保、二维质保以及多维质保。一般的,产品在初始销售时会附带基本质保(basic warranty, BW)条款。BW结束后,顾客需要对是否支付额外费用购买延长质保(extended warranty, EW)合同作出决策。从制造商的层面,只有当EW的售价超过EW期间所要承担的维修费用时才能盈利。因此,延长质保(延保)的价格是交易双方都关注的重要变量。近年来,一些学者通过考虑不同维修策略构建延长质保的定价模型。Jack等^[3]考虑顾客购买EW的时刻和范围,利用博弈论方法确定延长质保价格。Musakwa^[4]提出一个生存时间模型,用于解决有限使用量数据下的汽车延保定价问题。Bouguerra等^[5]在一维质保框架下,分析维修间隔期和质保范围对延保价格的影响。Tong等^[6]考虑顾客购买EW的时间点,研究二维EW的

定价机制。Darghouth等^[7]考虑维修过程中的学习效应,优化质保合同的价格和范围。

以上研究多关注修复性维修(corrective maintenance, CM),而实施预防性维修(preventive maintenance, PM)措施往往可以减少产品故障次数,降低质保成本和停机风险。Kim等^[8]从产品寿命周期的角度,讨论质保期内最优离散PM方案。Chen等^[9]考虑2类故障模式,分析连续PM措施对可更新免费更换质保策略的影响。Chang等^[10]制定产品寿命周期内最优PM方案以提高制造商利润。Su等^[11]研究柔性质保合同下质量升级和PM策略联合优化问题。Su和Wang^[12]以顾客何时购买EW为决策点,针对不同顾客分阶段地提供定制化PM服务。

现有文献主要考虑一维延长质保的优化问题,针对二维延长质保定价机制的研究还很少见。此外,由于工作环境和方式不同,产品的性能退化和故障规律存在很大差异,质保定价模型应考虑上述因素影响。本文将二维PM策略引入到延保价格模型中,考虑PM实施区间和顾客使用率的差异性,从交易双方的角度构建延长质保成本模型,采用网

收稿日期:2018-04-18

基金项目:国家自然科学基金(71671035)资助

作者简介:张晓磊(1989—),东南大学博士研究生,主要从事可靠性工程与质保理论研究。

通信作者:苏春(1970—),东南大学教授、博士生导师,主要从事可靠性工程研究。

E-mail: suchun@seu.edu.cn

格搜索法分析不同 PM 方案对延长质保价格的影响,并提出定制化的延长质保定价机制。

1 模型构建

假设制造商向顾客提供免费的 BW 服务, BW 区间为 $\Omega_b = (t, u), t \in [0, W_b], u \in [0, U_b]$, 其中 W_b 和 U_b 分别为 BW 的时间期限和使用量期限。BW 结束后, 顾客可以支付额外费用购买 EW 合同, EW 区间为 $\Omega_e = (t, u), t \in [W_b, W_b + W_e], u \in [U_b, U_b + U_e]$, W_e 和 U_e 分别为 EW 的时间范围和使用量范围。设质保期内产品发生的故障均采用最小维修方式加以修复, 维修时间忽略不计。为改善产品性能, 制造商实施一系列二维 PM 措施(每 K 个时间间隔或每 L 个使用量间隔实施一次 PM, 以先到者为准), 如图 1 所示。

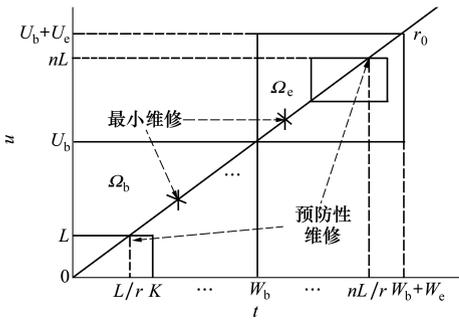


图 1 二维 PM 方案示意图

制造商承担质保期内产品发生故障的修复成本以及 PM 的投入成本, 并以此确定延保的最低售价, 消费者在 EW 的潜在维修费用界定了延保的最高价格。本文的主要目的是分析不同 PM 方案以及消费者使用率对延长质保价格的影响并探讨定制化的 PM 策略和延保价格机制。

1.1 产品故障建模

随着使用时间、使用量(里程、次数等)的增加, 机电产品的老化现象逐渐加深。为了解产品的退化性能, 需要对其故障过程进行建模和分析。常用的二维质保故障建模方法包括: 两变量法、复合尺度法和使用率法^[13]。由于使用率法能较好地反映时间和使用量对产品故障率的影响, 故本文采用使用率法。令 $t = 0$ 表示产品开始使用的时刻, $T(t)$ 和 $U(t)$ 分别表示产品在时间 t 时的累积使用时间和累

积使用量。假定产品在 $[0, t)$ 区间内没有发生故障或发生的故障都得到修复且修复时间可以忽略, 则 $T(t) = t$ 。使用率法假定 $U(t)$ 和 $T(t)$ 之间存在一个非负系数 R 的线性关系。以 R 表示产品的使用率, $R = U(t)/T(t) = U(t)/t$ 。不同用户的使用率具有差异, 但同一用户的使用率保持恒定, 并且单个产品在整个质保期内的使用率也是不变的。因此, 可以认为使用率 R 是一个非负的随机变量, 并服从函数 $G(r) = P\{R \leq r\}, 0 \leq r < \infty$ 。假设对发生故障的产品都采取最小维修方式, 则产品故障服从故障率为 $\lambda(t|r)$ 的非齐次泊松过程。为方便案例研究, 本文采用文献[12-13] 中的条件故障率函数来描述使用时间、顾客使用率(使用量与使用时间的比值)对产品性能退化的影响。其表达式如下

$$\lambda(t|r) = \theta_0 + \theta_1 r + \theta_2 T(t) + \theta_3 U(t) = \theta_0 + \theta_1 r + (\theta_2 + \theta_3 r)t \tag{1}$$

式中, $\theta_0, \theta_1, \theta_2, \theta_3$ 均为非负常数系数。

1.2 不完全 PM 建模

PM 可以减少产品的故障次数, 改变设备的故障率。本文采用文献[8] 的年龄回溯模型来描述 PM 的实施效果。实施 PM 能够减少产品的虚拟年龄, 减少量取决于 PM 的水平 $m, m \in [0, \infty]$ 且为整数, PM 的效果随着 m 的增加而增大。假定在质保期内的离散时刻 $(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_j)$ 实施 PM, 令 $\pi = 0$ 表示产品开始使用的时刻, 此时 $v_0 = 0$, 令 v_{j-1} 表示实施第 $(j-1)$ 次 PM 活动后产品的虚拟年龄, $j \geq 2$ 。则第 j 次 PM 活动实施前产品的虚拟年龄为 $v_j = v_{j-1} + (\pi_j - \pi_{j-1})$ 。若 PM 水平为 m , 则第 j 次 PM 活动后产品的虚拟年龄为 $v_j = v_{j-1} + \delta(m)(\pi_j - \pi_{j-1})$ 。 $\delta(m)$ 为 PM 的年龄递减因子, $0 \leq \delta(m) \leq 1$ 。 $\delta(m)$ 是 m 的递减函数, $\delta(0) = 1, \delta(\infty) = 0$ 。如果 $m = 0$, 则 PM 没有对产品故障率造成影响, 产品修旧如旧, 存在 $v_j = \pi_j, j \geq 2$; 如果实施最大水平的 PM, 则产品相当于修复如新。多数情况下, m 介于 0 与 ∞ 之间, 即实施不完全 PM 活动, 导致产品的故障率介于修旧如旧与修复如新之间的状态。本文采用指数型递减函数来描述 $\delta(m)$ 与 m 之间的关系, 即 $\delta(m) = (1 + m)e^{-m}$ 。

2 模型的建立

站在制造商的角度, 总质保成本包括最小维修

成本和 PM 成本。令 C_m 和 C_p 分别表示单次最小维修成本和单次 PM 成本, $E[C(K, L, m)]$ 表示制造商在 EW 内的期望质保成本, 其中 K 和 L 分别为 PM 活动的时间间隔和使用量间隔, m 为 PM 实施的水平。考虑到不同顾客使用率具有差异性, 其质保期结束的時刻也不一致。给定一类消费者的使用率为 r , 则其产品 BW 和 EW 结束时的时间分别为:

$$W_b^r = \min\{W_b, U_b/r\} = \begin{cases} W_b, & r \leq U_b/W_b \\ U_b/r, & r > U_b/W_b \end{cases} \quad (2)$$

$$W^r = \min\left\{W_b^r + W_e, W_b^r + \frac{U_e}{r}\right\} \quad (3)$$

于是, EW 的实际长度为

$$W_e^r = W^r - W_b^r = \min\left\{W_e, \frac{U_e}{r}\right\} \quad (4)$$

在 BW 和 EW 内, 基于时间维度下二维 PM 的间隔期分别为:

$$K_b^r = \min\{K_b, L_b/r\} \quad (5)$$

$$K_e^r = \min\{K_e, L_e/r\} \quad (6)$$

设质保期内 PM 的水平 m 保持不变, 则实施第 j 次 PM 活动后, 产品的虚拟年龄为

$$v_j^r = v_{j-1}^r + \delta(m)(\pi_j^r - \pi_{j-1}^r) = j\delta(m)K^r \quad (7)$$

2.1 刚性延保价格模型

基于以上描述, 分别从制造商和顾客的角度, 给出 4 种 PM 方案下延长质保的价格模型。分别令 $P_{l,i}$ 和 $P_{u,i}$ 表示制造商制定的最低延保价格和最高延保价格, $i = 1, 2, 3, 4$, 对应 4 种 PM 方案。从数值上看, $P_{l,i}$ 相当于 EW 内实现最优 PM 策略时的延长质保成本, 而 $P_{u,i}$ 根据 EW 内没有实施 PM 活动时的延长质保成本来确定。

Case 1 整个质保期内没有 PM 活动。令产品在延长质保期间的期望故障数为 N_e , 有

$$N_e = \int_0^{W_e^r} \lambda(W_b^r + t | r) dt \quad (8)$$

由于此方案下产品发生自然状态下的退化现象, 所以针对所有顾客, 延保价格为

$$P_{l,1} = P_{u,1} = E[C_1] = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} C_m N_e dG(r) \quad (9)$$

Case 2 在 $[0, W_b + W_e]$ 期间实施二维 PM 措施, 该策略下产品性能得到持续改善。

假定制造商实现最小质保服务成本时, PM 的时间间隔和使用度间隔分别为 (K^*, L^*) , 实施次数为 n^* 。令 n_b^* 表示在 (K^*, L^*) 策略下, BW 期间实施的 PM 次数。于是制造商在 EW 的质保服务成

本为

$$E[C_2^r(K_2, L_2, m_2)] = C_m \left(\sum_{j=1}^{n^*} \int_{(i-1)\delta(m)K^*}^{(i-1)\delta(m)K^* + K^*} \lambda(t | r) dt + \int_{n^*\delta(m)K^*}^{n^*\delta(m)K^* + W^r - n^*K^*} \lambda(t | r) dt \right) + \sum_{j=1}^{n_b^*} C_p - C_m \left(\sum_{j=1}^{n_b^*} \int_{(i-1)\delta(m)K^*}^{(i-1)\delta(m)K^* + K^*} \lambda(t | r) dt + \int_{n_b^*\delta(m)K^*}^{n_b^*\delta(m)K^* + W_b^r - n_b^*K^*} \lambda(t | r) dt \right) - \sum_{j=1}^{n_b^*} C_p \quad (10)$$

延长质保的价格为:

$$P_{l,2} = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} E[C_2^r(K_2, L_2, m_2)] dG(r) \quad (11)$$

$$P_{u,2} = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \left(C_m \int_0^{W_e^r} \lambda(W_b^r + t - (1 - \delta(m))n_b^*K^* | r) dt \right) dG(r) \quad (12)$$

Case 3 只在 $[0, W_b]$ 实施 PM 活动。该方案导致产品以较低的故障率进入 EW。

对于平均使用率 r , 制造商的延长质保服务成本为

$$E[C_3^r(K_3, L_3, m_3)] = C_m \int_0^{W_e^r} \lambda(W_b^r - (1 - \delta(m))n_b K_b + t | r) dt \quad (13)$$

由于 EW 期间没有 PM 活动, 所以延保价格为

$$P_{l,3} = P_{u,3} = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} E[C_3^r(K_3, L_3, m_3)] dG(r) \quad (14)$$

Case 4 只在延长质保期间实施 PM 项目。平均使用率 r 下, 制造商承担的延长质保成本为

$$E[C_4^r(K_4, L_4, m_4)] = \sum_{j=1}^{n_e} C_p + C_m \left(\sum_{j=1}^{n_e} \int_{(i-1)\delta(m)K_e}^{(i-1)\delta(m)K_e + K_e} \lambda(W_b^r + t | r) dt + \int_{n_e\delta(m)K_e}^{n_e\delta(m)K_e + W_e^r - n_e K_e} \lambda(W_b^r + t | r) dt \right) \quad (15)$$

延长质保价格为:

$$P_{l,4} = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} E[C_4^r(K_4, L_4, m_4)] dG(r) \quad (16)$$

$$P_{u,4} = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \left(C_m \int_0^{W_e^r} \lambda(W_b^r + t | r) dt \right) dG(r) \quad (17)$$

2.2 定制化延保价格模型

将顾客进行分类并提供相应的质保服务, 是定制化质保合同的有效做法。本文将使用率最低的 25% 顾客定义为低使用率群体, 使用率最高的 25% 顾客定义为高使用率群体, 其余 50% 顾客为中使用

率群体。根据该分类方法,延保最低售价可以调整为如下形式:

$$P_{l,i}^l = \int_{r_{\min}}^{r_l} E[C_i^l(K_i, L_i, m_i)] dG(r) \quad (18)$$

$$P_{l,i}^m = \int_{r_l}^{r_h} E[C_i^m(K_i, L_i, m_i)] dG(r) \quad (19)$$

$$P_{l,i}^h = \int_{r_h}^{r_{\max}} E[C_i^h(K_i, L_i, m_i)] dG(r) \quad (20)$$

于是,根据 EW 期顾客支付的最大潜在维修费用,延长质保的最高价格分别为:

$$P_{u,i}^l = \int_{r_{\min}}^{r_l} C_m N_i^l dG(r) \quad (21)$$

$$P_{u,i}^m = \int_{r_l}^{r_h} C_m N_i^m dG(r) \quad (22)$$

$$P_{u,i}^h = \int_{r_h}^{r_{\max}} C_m N_i^h dG(r) \quad (23)$$

上标 l, m 和 h 分别对应低、中和高使用率顾客, N_i^l, N_i^m 和 N_i^h 分别表示定制化方案下 3 类顾客的产品在 EW 内的期望故障次数。

3 案例分析

本节以某汽车零部件为例,验证模型的有效性。假定产品出售时附带二维质保合同,顾客面临购买 EW 的决策问题。设 $W_b = 3 \text{ a}, U_b = 3 \times 10^4 \text{ km}, W_e = 3 \text{ a}, U_e = 3 \times 10^4 \text{ km}; \lambda(t|r)$ 的参数设置为 $\theta_0 = 0.1, \theta_1 = 0.2, \theta_2 = 0.7, \theta_3 = 0.7$, 与文献[12]的数据相同。假设消费者的使用率 r 服从均匀分布,其概率密度函数为 $g(r) = 1/(r_{\max} - r_{\min}), r_{\min} \leq r \leq r_{\max}$ 。参考 Huang 等^[14]模型中的数值,本文取 $r_{\min} = 0.2 \times 10^4 \text{ km/a}, r_{\max} = 3.4 \times 10^4 \text{ km/a}$,并令 $r_l = 1.0 \times 10^4 \text{ km/a}$ 和 $r_h = 2.6 \times 10^4 \text{ km/a}$ 分别表示 $g(r)$ 的第 1 个和第 3 个四分位点。令 $C_m = 250$ 元,表 1 给出了不同

PM 水平下 $\delta(m)$ 和 C_p 的取值,与文献[8]的参数一致。可以看到,随着 m 的增大,年龄递减因子变小,同时所投入的 PM 费用升高。

表 1 PM 的相关参数

PM 水平 m	δ	$C_p/\text{元}$
0	1	0
1	0.736	10
2	0.406	30
3	0.199	60
4	0.092	100
5	0.040	160

工程实际中,预防性维修活动的实施通常是离散性的。本文利用 MATLAB 对模型进行求解,以得到最优的 PM 策略及相应的质保成本。为符合 PM 的可操作性,案例中 K 和 L 的搜索步长分别设置为 1 个月和 1 000 km。

3.1 刚性 PM 策略和延保价格

表 2 给出不同 PM 水平取值下相对应的 PM 策略及延长质保价格。图 2 显示了延长质保价格的取值范围。表 2 中 K^*, L^* 分别表示给定 PM 水平下,制造商实现最低质保服务成本时,实施 PM 措施的时间间隔和使用量间隔;价格区间 $[P_1, P_u]$ 中, P_1 表示制造商制定的最低延长质保售价, P_u 表示顾客愿意支付的最高延保价格。考虑制造商的盈利水平和顾客支付意愿,价格区间的中间值是双方总体满意度最大的选择。例如 $m = 1$ 时的 Case 2,延长质保价格区间为 $[2\ 014, 2\ 165]$ 元,平均价格 $P = (P_1 + P_u)/2 = 2\ 090$ 元。令 $P_r (P_r = P_u - P_1)$ 表示每个 Case 中延长质保售价的范围,显然 P_r 越大,双方的选择范围越大,制造商的利润空间和顾客承担维修费用的灵活性越大,满足双方需求的可行解越丰富,如图 3 所示。

表 2 面向所有顾客的 PM 策略和延保价格

PM 水平 m	Case 1	Case 2		Case 3		Case 4				
	$[P_1, P_u]$	K^*	L^*	$[P_1, P_u]$	K^*	L^*	$[P_1, P_u]$			
0				$[2\ 552, 2\ 552]$			$[2\ 552, 2\ 552]$			
1		5	9	$[2\ 014, 2\ 165]$	8	8	$[2\ 200, 2\ 200]$	8	8	$[2\ 425, 2\ 552]$
2	$[2\ 552, 2\ 552]$	8	9	$[1\ 370, 1\ 717]$	8	11	$[1\ 774, 1\ 774]$	8	11	$[2\ 290, 2\ 552]$
3		8	12	$[1\ 023, 1\ 478]$	9	11	$[1\ 590, 1\ 590]$	9	11	$[2\ 247, 2\ 552]$
4		9	15	$[921, 1\ 511]$	12	15	$[1\ 634, 1\ 634]$	12	15	$[2\ 267, 2\ 552]$
5		12	15	$[961, 1\ 583]$	12	15	$[1\ 583, 1\ 583]$	12	15	$[2\ 327, 2\ 552]$

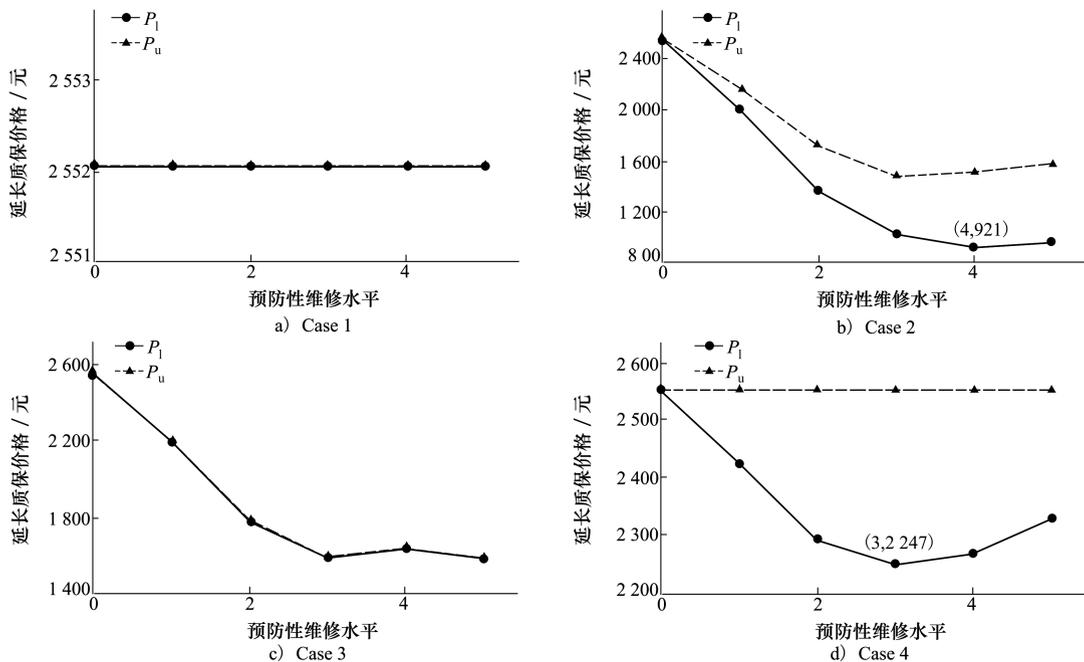


图 2 4 种 PM 方案下的延保价格

表 3 高使用率顾客的 PM 策略和延保价格

PM 水平 m	Case 1		Case 2		Case 3		Case 4	
	$[P_l, P_u]$	K^* L^*	$[P_l, P_u]$	K^* L^*	$[P_l, P_u]$	K^* L^*	$[P_l, P_u]$	$[P_l, P_u]$
0			[309, 309]		[309, 309]			[309, 309]
1		5 10	[175, 276]	5 11	[275, 275]	5 11	[298, 309]	
2		6 12	[124, 225]	5 11	[232, 232]	5 11	[289, 309]	
3	[309, 309]	7 15	[137, 238]	7 15	[238, 238]	7 15	[288, 309]	
4		7 15	[143, 228]	7 15	[228, 228]	7 15	[294, 309]	
5		10 20	[165, 196]	7 15	[224, 224]	7 15	[306, 309]	

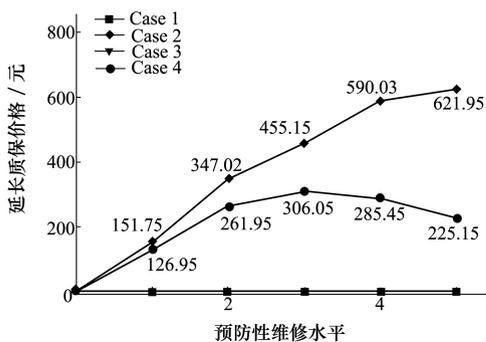


图 3 不同 PM 方案下的延保价格范围

1) Case 1 和 Case 3 中,EW 期没有 PM 活动,所以 $P_l = P_u$,如图 2a)和图 2c)所示。2 252 元是 Case 1 的平衡点,延保价格高于 2252 元,顾客购买 EW 的意愿将会降低;而低于 2250 元,制造商则没有质保收益。在 Case 3 中,BW 实施了 PM 措施,产品以较低的故障率进入 EW 期,延保价格低于 Case 1。

2) Case 2 中, P_l 随着 m 的增加而增大,如图 3 所示。二维 PM 策略存在一个现象:当 $m = 4$ 时,制造商的质保费用最低为 921 元,如图 2b)所示,此时 PM 的间隔期为 9 个月或 1.5×10^4 km。原因在于 $m \geq 4$ 时, $\delta(m)$ 逐渐变小,但是单次 PM 费用却急速增加。

3) 不同方案中,最优 PM 策略也具有差异性

根据上述结果,可以得到以下结论:

(Case 2 中 $m=4$, 间隔期为 9 个月或 1.5×10^4 km, 该方案的 P_r 也更大, 如图 3 所示; 而 Case 3 和 Case 4 中 $m=3$, 间隔期为 9 个月或 1.1×10^4 km)。部分原因是 BW 和 EW 期内分别单独实施 PM 措施时, PM 的间隔期相对小, 造成的虚拟年龄减少量也较少, 导致产品的故障率和质保成本下降的少。

3.2 定制化延保价格策略

实际中, 顾客之间的产品使用模式具有差异性, 导致产品呈现出不同的退化规律。因此, 基于使用率将顾客进行分类, 制定与使用模式相适应的 PM 方案和延保价格机制会更符合工程实际需求, 也可以为不同顾客提供更多选择柔性质保策略的机会。

表 4 中使用率顾客的 PM 策略和延保价格

PM 水平 m	Case 1		Case 2		Case 3		Case 4	
	$[P_1, P_u]$	K^* L^*						
0			[1 257, 1 257]		[1 257, 1 257]		[1 257, 1 257]	
1		5 9	[995, 1074]	6 8	[1 084, 1 084]	6 8	[1 195, 1 257]	
2	[1 257, 1 257]	6 9	[682, 850]	9 8	[891, 891]	9 8	[1 131, 1 257]	
3		8 12	[516, 744]	9 11	[777, 777]	9 11	[1 112, 1 257]	
4		10 12	[457, 688]	12 11	[745, 745]	12 11	[1 125, 1 257]	
5		12 15	[484, 775]	18 15	[886, 886]	18 15	[1 152, 1 257]	

表 5 低使用率顾客的 PM 策略和延保价格

PM 水平 m	Case 1		Case 2		Case 3		Case 4	
	$[P_1, P_u]$	K^* L^*						
0			[986, 986]		[986, 986]		[986, 986]	
1		8 4	[765, 836]	8 4	[836, 836]	8 4	[930, 986]	
2	[986, 986]	8 7	[499, 654]	9 5	[679, 679]	9 5	[868, 986]	
3		9 8	[353, 608]	9 8	[608, 608]	9 8	[842, 986]	
4		12 10	[298, 605]	12 10	[605, 605]	12 10	[845, 986]	
5		12 10	[300, 583]	12 10	[583, 583]	12 10	[865, 986]	

表 3~5 分别给出了 3 类使用率顾客的最优 PM 策略和延保价格。据此可以得出以下结论:

1) 针对 P_1 与 P_u 的值, 高使用率顾客最小, 中使用率最大, 低使用率介于两者之间, 如表 3~5 所示。这是由于: 高使用率顾客在很短时间内便结束了质保期, 产品发生故障的维修费用最少; 质保结束时低使用率顾客的使用量远低于使用度期限 (U), 说明产品的使用频次比较低, 维修费用也较少; 中使用率顾客的使用时间和使用量都很接近 2 个维度的期限 (W 和 U), 产品的使用频次和使用时间都很高, 因此产品在 2 个维度上将会发生严重的退化现象。

2) 在 Case 2、Case 3 和 Case 4 中, 随着 m 的增加, 二维 PM 的间隔期逐渐变大。说明 PM 的投入

程度越大, 相应的实施频次越低, 以缓解投入过高的 PM 成本。

3) 顾客使用模式的差异性导致相应的 PM 策略也随之改变。以 Case 2 为例, 对于高使用率顾客, 当 $m=2$ 、间隔期为 6 个月或 1.2×10^4 km 时, 制造商的质保成本最小, P_r 也最大; 而针对中、低使用率顾客, $m=4$ 时, 制造商的质保成本最少, PM 的间隔期分别为 10 个月或 1.2×10^4 km、12 个月或 1.0×10^4 km。说明顾客的使用率越高, PM 的实施频次也相应提高, 以减缓产品过高的故障率。

4 结 论

本文在二维质保框架下, 针对免费维修质保合

同内随机失效的产品,研究延长质保的定价问题。为反映使用时间和使用量对产品退化性能的影响,引入二维 PM 策略。通过构建 EW 的成本模型,分析不同 PM 方案对延保价格的影响,并提出定制化的延保价格机制。根据案例分析,得出如下结论:①在 BW 和 EW 期内实施统一的 PM 措施,制造商会获得更高的延保收益,顾客也能够体验较高的产品

性能;②为不同使用强度的顾客提供定制化的延长质保价格和 PM 策略更加符合实际需求。后续研究可以采用按比例分摊质保、可更新免费更换质保等策略。此外,考虑多种维修方式的组合、顾客的风险偏好、环境变量以及不同分布的用户使用率等因素,也可以丰富柔性质保定价问题,得到更加符合工程实际的质保策略。

参考文献:

- [1] COHEN M A, AGRAWAL N, AGRAWAL V. Winning in the Aftermarket[J]. Harvard Business Review, 2006, 84(5): 129-138
- [2] BLISCHKE W R, MURTHY D N P. Product Warranty Management-I: A Taxonomy for Warranty Policies[J]. European Journal of Operational Research, 1992, 62(2): 127-148
- [3] JACK N, MURTHY D N P. A Flexible Extended Warranty and Related Optimal Strategies[J]. Journal of the Operational Research Society, 2007, 58(12): 1612-1620
- [4] MUSAKWA F T. Pricing a Motor Extended Warranty with Limited Usage Cover[J]. Astin Bulletin, 2015, 45(1): 101-125
- [5] BOUGUERRA S, CHELBI A, REZG N. A Decision Model for Adopting an Extended Warranty under Different Maintenance Policies[J]. International Journal of Production Economics, 2012, 135(2): 840-849
- [6] TONG P, LIU Z X, MEN F, et al. Designing and Pricing of Two-Dimensional Extended Warranty Contracts Based on Usage Rate[J]. International Journal of Production Research, 2014, 52(21): 6362-6380
- [7] DARGHOOUTH M N, AITKADI D, CHELBI A. Joint Optimization of Design, Warranty and Price for Products Sold with Maintenance Service Contracts[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2017, 165: 197-208
- [8] KIM C S, DJAMALUDIN I, MURTHY D N P. Warranty and Discrete Preventive Maintenance[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2004, 84(3): 301-309
- [9] CHEN J A, CHIEN Y H. Renewing Warranty and Preventive Maintenance for Products with Failure Penalty Post-Warranty[J]. Quality & Reliability Engineering International, 2007, 23(1): 107-121
- [10] CHANG W L, LIN J H. Optimal Maintenance Policy and Length of Extended Warranty within the Life Cycle of Products[J]. Computers & Mathematics with Applications, 2012, 63(1): 144-150
- [11] SU C, WANG X L. Optimizing Upgrade Level and Preventive Maintenance Policy for Second-Hand Products Sold with Warranty[J]. Journal of Risk and Reliability, 2014, 228(5): 518-528
- [12] 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
- [13] WANG Y K, LIU Z X, LIU Y L. Optimal Preventive Maintenance Strategy for Repairable Items under Two-Dimensional Warranty[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2015 142(5): 326-333
- [14] HUANG Y S, HUANG C D, HO J W. A Customized Two-Dimensional Extended Warranty with Preventive Maintenance[J]. European Journal of Operational Research, 2016, 257(3): 971-978

Research on Pricing of Flexible Two-Dimensional Extended Warranty Considering Preventive Maintenance

ZHANG Xiaolei, SU Chun

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

Abstract: Facing the uncertainty in transaction of two-dimensional extended warranty, a flexible pricing model is presented considering imperfect preventive maintenance combined with the degradation characteristics of item. The measure of two-dimensional preventive maintenance is carried out based on specified age interval or usage interval, the effect of imperfect preventive maintenance is described by age reduction model. The extended warranty cost is modeled from the perspective of manufacturer and customer, the method of gridding search is employed to optimize the maintenance strategy under different cases. Moreover, customized extended warranty price and warranty services are proposed on the basis of consumer usage rates. The results demonstrate that it is helpful to maximize the benefit of vendor by providing customized warranty strategy, the implementation of preventive maintenance during the whole warranty period can effectively reduce warranty cost for both sides.

Keywords: extended warranty; two-dimensional preventive maintenance; usage rate; customized warranty strategy; flexible pricing