

doi: 10.19920/j.cnki.jmsc.2023.02.002

医疗设备延期保修策略与定价^①

——基于博弈论的最优决策

张才文, 谭清元

(中山大学管理学院, 广州 510275)

摘要: 研究制造商和医院在医疗设备延期保修策略和定价问题上的博弈和最优决策. 与现有研究相比, 本文提出了更加灵活多样的延保策略, 并考虑了设备的预防性检修这一重要的售后服务选项. 本研究将医院分成两种类型, 即大型医院和中小型医院. 制造商提供 6 种延期保修方案供医院选择. 由于受到各种现实条件的制约, 在医疗设备售后服务市场上, 医院依赖于制造商提供延期保修服务, 因此本文采用了 Stackelberg 模型分析制造商和医院之间的博弈和决策, 构建了 Weibull/ $M/S/\infty/M_1 + M_2$ /FCFS 服务排队模型, 并基于制造商利润最大化和医院效用最大化求得均衡解, 最后采用仿真优化技术进行数值分析. 研究发现, 制造商的最优策略是在自己维保队伍的能力范围内尽可能服务更多的大型医院以提高自己的利润; 而两类医院作为博弈的跟随者, 他们的最优策略是选择享有维修优先权的高级全保方案, 其中包含定期的预防性检修和故障维修服务, 以实现效用最大化. 另一方面, 对于医疗设备的延保服务, 包含预防性检修和故障维修的策略相对于仅提供故障维修的策略来说是一个帕累托改进, 他能同时提高制造商的利润并降低医院的延保成本. 鉴于此, 对医疗设备进行预防性检修应该作为一项标准实践来推广.

关键词: 医疗设备; 延期保修; 预防性检修; Stackelberg 博弈; 排队模型

中图分类号: F224.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9807(2023)02-0015-21

0 引言

产品保修政策 (warranty) 是制造商与顾客之间的一项服务契约, 他规定产品制造商或经销商在产品保修期内对产品出现的故障履行维修、更换或赔偿等义务. 作为产品售后服务最重要的部分, 保修政策不仅能够保障顾客的利益, 减少产品质量问题给顾客带来的损失和风险, 同时还能保护制造商免遭顾客不合理或过分的售后索赔, 因而对买卖双方都是有利的. 另一方面, 产品保修政策还可以被看作是产品质量和可靠性的指标, 从而成为制造商营销和推广产品的手段^[1, 2]. 在过去 30 年间, 已经产生了很多关于产品保修方案

及政策的研究文献^[3-8]. 尽管已经有大量的文献研究消费类产品的保修政策, 但是针对医疗设备的保修政策的研究却十分稀少. 医疗设备如 CT 扫描仪 (Computed Tomography)、MRI 磁共振成像仪 (Magnetic Resonance Imaging) 等具有十分独特的行业特性, 如科技含量高、价格昂贵、工作负荷高、寿命长等^[9-12]. 如果医疗设备出现故障或存在缺陷, 将会给医患双方造成严重的后果, 直接影响病情的诊断、治疗和医疗服务质量, 同时也会给医院带来经济损失. 因此, 医疗设备的维修和保养是医院管理的一项重要任务.

目前, 为医疗设备提供售后维保服务的主要

① 收稿日期: 2020-12-07; 修订日期: 2021-09-26.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (71771221).

作者简介: 张才文 (1978—), 男, 湖北黄冈人, 博士, 副教授, 博士生导师. Email: zhangcw@mail.sysu.edu.cn

有三方力量:一是医院自雇的医学工程技术人员;二是原始设备制造商(简称制造商);三是第三方维保服务外包商(简称服务外包商)。三种方案都有各自的优缺点。对于医院而言,雇用自己的医学工程技术人员可能是最好的选择。但是,由于医疗设备专业性强,技术越来越复杂,一些高端医疗设备也不断迈向智能化和网络化,这对于执行维修保养的工作人员的知识和技能的要求非常高。如果得不到制造商的充分支持,医院内部的医学工程技术人员很可能无法及时有效地完成设备的维修和保养^[9]。另一方面,在医疗设备售后服务市场上,由于技术实力不足、无法获得制造商的技术支持文档和备件、专利及核心技术保护、维保质量不能保证、制造商的保护主义策略等原因,服务外包商通常也无法与制造商竞争^[11,13]。因此,制造商基本能形成垄断优势。

关于保修政策的最优化决策问题不仅需要采用产品全生命周期的视角,而且还需要同时兼顾制造商和顾客的利益。博弈论提供了研究竞争双方或多方之间互动的有效方法和工具,他能在兼顾对方可能采取合作或非合作行动的情况下最大化己方的利益^[14-17]。博弈模型已经被广泛应用于产品保修政策的分析、设计和优化,其中包括 Nash 博弈模型^[1,18]、Stackelberg 博弈模型^[19-20],合作博弈和非合作博弈等^[21-23]。

研究聚焦于医疗设备延期保修(extended warranty, 延保或 EW)的策略与定价问题。迄今为止,大部分有关保修策略的研究都是关于基本保修(basic warranty)。基本保修的执行成本通常包含在产品的售价中^[24,25]。有关延期保修的研究相对比较少。延期保修是一项可选的服务,其为产品提供基本保修期结束后一定期限之内的维保服务^[26-29]。Jack 和 Murthy^[25]提出了一个简单的模型,分析一个制造商和一个顾客之间的博弈,以及延保政策的设计问题;其中,顾客可以选择购买延保合同或选择每次支付维修费用。Moura 等^[12]针对医疗设备的延保策略问题展开了研究,其采用了 Stackelberg 模型分析了设备制造商和医院之间的竞争博弈,但该文所研究的延保策略中没有考虑预防性检修(preventive maintenance, PM)。对于医疗设备而言,为了确保设备运行的稳定性、安全性,以及服务质量和效率,快速高效的故障维修和

定期的预防性检修都同等重要^[9]。已经有研究表明 PM 服务对于保修策略的优化设计有重要影响^[30-32]。因此本研究目标之一是分析 PM 服务对医疗设备延保策略的影响。

另一方面,当制定保修政策时,如果能提供若干备选方案从而使顾客可以选择最适合自己的选项,将有利于提高顾客的满意度。但是,迄今为止有关灵活保修政策(flexible warranty policy)的研究很少^[5,12]。鉴于此,本研究将改进前人的研究,提出更加灵活和丰富的延保政策,并考虑 PM 服务这一重要的售后服务选项,研究医疗设备的最优延保策略与定价以及医院的最优选择问题。

1 问题描述

研究聚焦于延保阶段主要有以下原因。在基本保修期,所有的故障维修都由制造商负责,而顾客不用支付额外的成本^[5,30]。但是,在延保阶段如何制定和选择最优的延保政策对于制造商和顾客而言都需要认真权衡利弊。对于制造商而言,虽然延保合同可以为自己带来额外的收益,但同时也需要付出额外的维保服务执行成本。对于顾客而言,如何选择最优的延保合同,比如合同是否包含 PM 服务,同样需要权衡成本和收益。选择购买包含 PM 服务的合同虽然要支付额外的成本,但也能降低设备发生故障的风险,延缓设备的老化,并延长设备的寿命。因此,是否包含 PM 服务也是延保政策设计和选择中的重要变量。

借鉴 Moura 等^[12]将研究对象医院按照规模的大小分成两类,即大型医院和中小型医院。大型医院购置的医疗设备较多,就诊患者也多,医院财力雄厚,设备使用率高,因此维保需求量大。中小型医院所购置的医疗设备较少,就诊患者也相对较少,因此设备使用率较前者低,维保需求量较小。另外,假设每类医院都是“均质的”(homogeneous),即同一类型医院都具有相同的风险偏好,并会做出相似的决策^[12]。

当设备的基本保修期结束之后,医院需要选择购买延保合同或方案。研究提出的延保方案取决于三个变量。第一个变量是关于延保的合同形

式,即“全保”和“次保”两种.全保即医院以一定的价格购买一段时间内的全部维保服务,而无须为合同期内发生的维保服务支付额外的费用;次保即医院在设备出现故障时为每一次的维修服务支付相应的费用.当一台设备发生故障时,他将进入待修设备队列等候制造商的技术人员进行维修.在 Moura 等^[12]一文中,作者假设制造商只有一支维修服务队伍;但考虑制造商拥有多支维修服务队伍的情境,以期更加符合现实.因而就产生了第二个变量,即接受维修服务的优先级别.如果一家医院为其设备购买了高优先级的服务,则在设备出现故障时享有优先接受服务的权利,即可以进入待修队伍的前列;如果队伍中存在多个享有相同优先级的设备,则将按照“先来先得”(first-come, first-served, FCFS)的原则接受服务.第三个变量是延保方案是否包含 PM 服务.

因此,制造商总共可以向医院提供 6 种延保方案,分别是: A_1 —享有优先权的高级全保方案甲(包含 PM 服务); A_2 —享有优先权的高级全保方案乙(不含 PM 服务); A_3 —无优先权的标准全保方案甲; A_4 —无优先权的标准全保方案乙; A_5 —享有优先权的高级次保; A_6 —无优先权的标准次保.理论上,医院也可选择不购买任何延保方案,记为 A_0 .6 种延保方案的具体描述如下:

A_1 : 高级全保方案甲

医院以固定的价格与制造商签订延保合同,并在设备发生故障时在待修队列中享有较高的优先级.合同价格为 P_{EWA}^H ,合同有效期为 T .合同期内制造商须为医院的设备提供定期的 PM 服务和故障维修服务,并承诺在设备发生故障时,在 τ_H 时间内选派维保队伍上门;若实际等待时间 $y > \tau_H$,则认定为上门延误,制造商须向医院支付 $\alpha_H(y - \tau_H)$ 的延误赔偿金.在合同期 T 内,所有的维保服务均由制造商负责,不再向医院收取额外费用.

A_2 : 高级全保方案乙

医院以固定的价格与制造商签订延保合同,并在设备发生故障时在待修队列中享有较高的优先级.合同价格为 P_{EWB}^H ,合同有效期为 T .合同期内制造商仅为医院的设备提供故障维修服务,而不提供 PM 服务,并承诺在设备发生故障时,在 τ_H 时间内选派维保队伍上门;若实际等待时间 $y >$

τ_H ,则认定为上门延误,制造商须向医院支付 $\alpha_H(y - \tau_H)$ 的延误赔偿金.在合同期 T 内,所有的维保服务均由制造商负责,不再向医院收取额外费用.

A_3 : 标准全保方案甲

医院以固定的价格 P_{EWA}^L 与制造商签订延保合同,在设备发生故障时依次序加入待修队列.合同有效期为 T ,在合同期内制造商为医院的设备提供定期的 PM 服务和故障维修服务,并承诺在设备发生故障时,在 τ_L 时间内选派维保队伍上门,若出现上门延误,制造商须向医院支付 $\alpha_L(y - \tau_L)$ 的延误赔偿金.在合同期 T 内,所有的维保服务均由制造商负责,不再向医院收取额外费用.

A_4 : 标准全保方案乙

医院以固定的价格 P_{EWB}^L 与制造商签订延保合同,在设备发生故障时依次序加入待修队列.合同有效期为 T ,在合同期内制造商仅为医院的设备提供故障维修服务,而不提供 PM 服务,但承诺在设备发生故障时,在 τ_L 时间内选派维保队伍上门,若出现上门延误,制造商须向医院支付 $\alpha_L(y - \tau_L)$ 的延误赔偿金.在合同期 T 内,所有的维保服务均由制造商负责,不再向医院收取额外费用.

A_5 : 高级次保

当医疗设备发生故障时,享有维修优先权,加入待修设备的前列.制造商为设备提供最小维修服务(minimal repair, MR),使设备恢复到故障前的状态,医院在设备修复后支付当次维修费用 P_{MR}^H .由于没有签订合同,制造商对于等待维修的时间不作承诺,也不存在延误赔偿金.

A_6 : 标准次保

当医疗设备发生故障时,不享有维修优先权,依次序加入待修队列.制造商为设备提供最小维修服务,使设备恢复到故障前的状态,医院在设备修复后支付当次维修费用 P_{MR}^L .由于没有签订合同,制造商对于等待维修的时间不作承诺,也不存在延误赔偿金.

表 1 列出了 6 种延保方案的对比.延保方案 A_1, A_3 的示意图见图 1.在延保期 T 内,制造商执行定期的 PM 服务,因而将延保期 T 划分为若干个小周期 T' .在每个小周期 T' 内,若设备发生随

机故障,制造商将为设备提供故障维修,即MR服务. 延保方案 A_2, A_4, A_5, A_6 的示意图见图2. 在

延保期 T 内,若设备发生随机故障,制造商将为设备执行故障维修.

表1 6种延保方案的对比

Table 1 Comparison of the six EW policies

延保方案	定价	优先级	PM	延误赔偿金
A_1	P_{EWA}^H	高	√	$\alpha_H(y - \tau_H)$
A_2	P_{EWB}^H	高	×	$\alpha_H(y - \tau_H)$
A_3	P_{EWA}^L	低	√	$\alpha_L(y - \tau_L)$
A_4	P_{EWB}^L	低	×	$\alpha_L(y - \tau_L)$
A_5	P_{MR}^H	高	×	无
A_6	P_{MR}^L	低	×	无

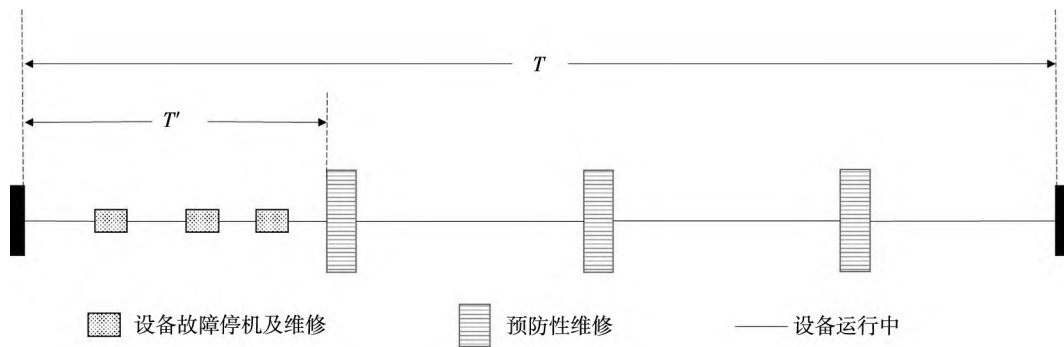


图1 延保方案 A_1, A_3 的示意图

Fig. 1 Illustration of operations of EW policies A_1, A_3

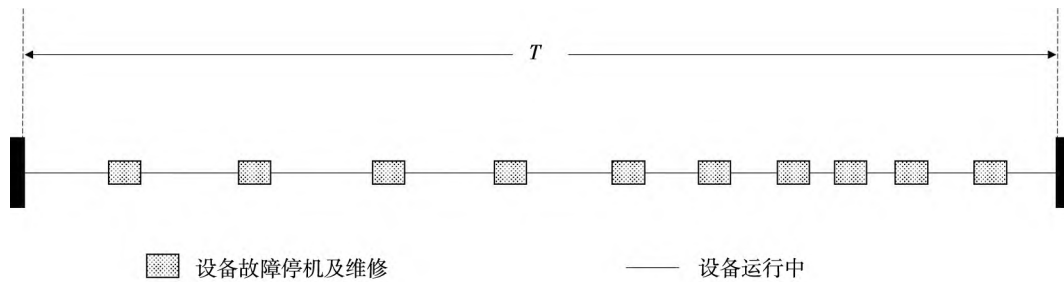


图2 延保方案 A_2, A_4, A_5, A_6 的示意图

Fig. 2 Illustration of operations of EW policies A_2, A_4, A_5, A_6

鉴于前文所述的制造商在医疗设备售后服务市场上的垄断地位,采用 Stackelberg 模型来分析制造商和医院之间的博弈行为. 博弈分两阶段进行: 1) 首先,制造商(先行者)分析医院的最高支付意愿,并制定延保方案,包括延保期、方案定价、PM 服务的周期等; 2) 两类医院(跟随者)分析制造商提供的延保方案,选择最优的全保或次保方案,以及是否购买服务优先权.

2 模型构建

模型的构建需要以下基本假设:

1) 医疗设备的基本保修期是固定的,保修期满时,设备的状态相同,不受保修期内设备运行、故障和维修的情况影响. 延保期也为定值.

2) 医疗设备会随着使用年限的增长而逐渐老化,其故障发生时间服从形状参数为 k ,比例参

数为 θ 的 Weibull 分布.

3) 当设备发生故障时, 仅执行 MR 服务, 维修完成后设备故障率恢复到故障发生前的水平, 即“恢复如旧”. 故障维修的耗时服从参数为 μ 的指数分布, μ 值越大, 表示维修服务的平均耗时越短.

4) PM 服务的耗时是常量, 执行 PM 服务的时

间点是预定的, 经合理安排后设备无需排队等待.

为方便阅读, 表 2 对文中的变量和参数符号给予了定义或解释说明; 其中, 决策变量包括两类医院的服务数量 M_1, M_2 , 延保期内 PM 服务的周期数 ω , 以及各延保方案的定价 $P_{EWA}^c, P_{EWB}^c, P_{MR}^c$, 其余是模型参数.

表 2 符号与释义

Table 2 Notations and explanations

符号	释义
T	延保期
T'	PM 服务执行周期, 固定长度
k, θ	Weibull 分布形状参数, 比例参数
ω	$\omega = T/T'$, 延保期 T 被 PM 服务均分成小周期 T' 的数量
c	$c = H, L$, 指代服务优先级: H 指代高优先级, L 指代低优先级
R_1, R_2	大型医院、中小型医院使用某种医疗设备单位时间创造的收益
b_1, b_2	大型医院、中小型医院拥有的医疗设备的数量
w	延保期 T 内, 医院使用某种医疗设备所获得的经济收益
γ	医院的社会效益
φ_1, φ_2	大型医院、中小型医院医疗设备的单位时间平均接诊人次
A_1^*, A_2^*	大型医院、中小型医院选择的最优延保方案
τ_c	医院购买 c 类服务时, 制造商承诺的从设备发生故障到上门修理的最长时间
α_c	惩罚因子, 制造商因上门延误向医院支付的单位时间延误赔偿金
τ_p	执行一次 PM 服务的耗时
μ	故障维修时间服从参数为 μ 的指数分布
β_1, β_2	医院效用函数的权重系数
P_{EWA}^c	c 类服务的全保方案甲的价格
P_{EWB}^c	c 类服务的全保方案乙的价格
P_{MR}^c	c 类服务的次保价格
U_1, U_2	大型医院、中小型医院的效用函数
N_j	$1 \leq j \leq \omega$, 在 $[T'_{j-1}, T'_j]$ 内执行的 MR 次数
N	在没有 PM 服务的情况下, 一个延保期 T 内执行 MR 服务的总次数
X_{ji}	$1 \leq i \leq N_j$, 在 $[T'_{j-1}, T'_j]$ 内从发生第 $(i-1)$ 次故障到第 i 次故障之间的设备运转时间
X_i	$1 \leq i \leq N$, 在延保期 T 内从发生第 $(i-1)$ 次故障到第 i 次故障之间的设备运转时间
X_j	发生第 N_j 次故障后到 T'_j 截止时的设备运转时间
X	发生第 N 次故障后到延保期 T 结束时的设备运转时间
y_{ji}	在 $[T'_{j-1}, T'_j]$ 内, 从第 i 次故障发生到维修人员上门修理的等待时间
C_{pm}, C_{mr}	执行一次 PM 的平均成本, 执行一次 MR 的平均成本
v	$v = \sum_{j=1}^{\omega} \left(\sum_{i=1}^{N_j} \max\{0, y_{ji} - \tau\} \right)$ 表示延保期 T 内每台设备的延误总时长
M_1, M_2, M	制造商服务的大型医院、中小型医院的数量, 以及总数 $M = M_1 + M_2$
S	制造商拥有的维修队伍数量
$P_{EWA}^{c, \max}$	医院愿意支付的 c 类服务全保方案甲的最高价格
$P_{EWB}^{c, \max}$	医院愿意支付的 c 类服务全保方案乙的最高价格
$P_{MR}^{c, \max}$	医院愿意支付的 c 类服务次保的最高价格

2.1 故障与维修模型

现有文献中许多以故障发生服从指数分布为基本假设,但指数分布虽然可以带来数学上的简便却在很多实际应用中并不符合现实.因此,采用更加灵活的 Weibull 分布来模拟设备的故障发生时间,其在可靠性分析和寿命测试领域已经得到非常广泛和成功的应用^[33].假设设备的故障发生时间 t 服从形状参数为 k 、比例参数为 θ 的 Weibull 分布,其概率分布函数为

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\theta}\right)^k\right], t > 0 \quad (1)$$

假设 PM 是不完美维修,能够减缓设备的老化速度,在一定程度上降低设备的故障率.对设备定期地执行 PM 服务会降低其故障发生的概率.以 t_0 表示执行 PM 或 MR 服务时设备的总服役时长,令 x 表示设备在接受 PM 或 MR 服务并重新运行后到发生下一次随机故障之间的时间,则可知其服从条件 Weibull 分布^[12],其概率密度函数为

$$f(x | t_0; \theta, k) = \frac{k}{\theta} \left(\frac{x+t_0}{\theta}\right)^{k-1} \exp\left[\left(\frac{t_0}{\theta}\right)^k - \left(\frac{x+t_0}{\theta}\right)^k\right] \quad (2)$$

上式的推导过程如下

$$\begin{aligned} F(x | t_0) &= P(X \leq x + t_0 | X > t_0) \\ &= \frac{P(t_0 < X \leq x + t_0)}{P(X > t_0)} \\ &= \frac{e^{-\left(\frac{t_0}{\theta}\right)^k} - e^{-\left(\frac{x+t_0}{\theta}\right)^k}}{e^{-\left(\frac{t_0}{\theta}\right)^k}} \\ &= 1 - e^{\left(\frac{t_0}{\theta}\right)^k - \left(\frac{x+t_0}{\theta}\right)^k} \end{aligned}$$

故概率密度函数为

$$\begin{aligned} f(x | t_0) &= \frac{d}{dx}F(x | t_0) \\ &= \frac{k}{\theta} \left(\frac{x+t_0}{\theta}\right)^{k-1} \exp\left[\left(\frac{t_0}{\theta}\right)^k - \left(\frac{x+t_0}{\theta}\right)^k\right] \end{aligned}$$

因此,在后续的仿真实验中可以通过式(2)生成随机故障发生时间 x ,即

$$x = \theta \left[\left(\frac{t_0}{\theta}\right)^k - \ln(\text{Unif}(0, 1)) \right]^{\frac{1}{k}} - t_0 \quad (3)$$

其中 $\text{Unif}(0, 1)$ 表示在 $(0, 1)$ 区间上均匀分布的随机数.

2.2 医院的效用函数

在中国,公立医院是医疗服务体系的主体.与

企业以追求利润最大化为目标不同的是,公立医院是满足国民医疗需求、提供公共服务的主体,因而更多的体现其公益性和社会责任.2019年国务院办公厅发布的《关于加强三级公立医院绩效考核工作的意见》也明确指出,既要坚持公立医院的公益性导向,也要保证医院医疗收入结构的合理性,推动实现收支平衡、略有结余,有效体现医务人员技术劳务的价值.因此,研究采用的医院效用函数将由两部分构成,一部分反映医院的经济收益,另一部分体现医院的社会效益^[34],即

$$U = \beta_1 w + \beta_2 \gamma \quad (4)$$

其中 β_1, β_2 为权重系数; w 为医院的经济收益; γ 为医院的社会效益.

医生使用医疗设备为患者进行医学检查或辅助诊疗,将为医院创造一定的经济收益和社会效益,二者的大小应与医疗设备的运行时间成正比.一般情况下,设备正常运行的时间越长,其为医院创造的经济收益和社会效益越大;而当设备停机时,则不创造任何经济收益或社会效益.本模型中,医院的经济收益由三部分构成:一部分来自使用医疗设备创造的医疗收入,与设备的运行时间成正比;另一部分来自设备故障时制造商因维修队伍上门延误而支付给医院的延误赔偿金;此外,还需扣除医疗设备的维保成本.在医疗设备正常运行的情况下,将大型医院每单位时间创造的收益设为 R_1 ,中小型医院每单位时间创造的收益设为 R_2 .将大型医院拥有的设备数量设为 b_1 ,中小型医院的设备数量设为 b_2 .以大型医院购买延保方案 A_1 为例,医院使用医疗设备所获得的经济收益构成包括: b_1 台设备共产生的收益为 $\sum_{i=1}^{b_1} \left(R_1 \sum_{j=1}^{\omega} \left(\sum_{i=1}^{N_j} X_{ji} + X_j \right) \right)$; 延误赔偿金为 $\sum_{i=1}^{b_1} \left(\alpha_H \sum_{j=1}^{\omega} \left(\sum_{i=1}^{N_j} \max\{0, (y_{ji} - \tau_H)\} \right) \right)$; 支付给制造商的维保费用为 $P_{EWA}^H b_1$.以此类推,根据医院选择的不同延保方案 $A_1 \sim A_6$,在延保期 T 内,医院获得的经济收益 $w(A_1) \sim w(A_6)$ 分别为

$$\begin{aligned} w(A_1 | R_h) &= \sum_{i=1}^{b_h} \left(R_h \sum_{j=1}^{\omega} \left(\sum_{i=1}^{N_j} X_{ji} + X_j \right) \right) + \\ &\alpha_H \sum_{j=1}^{\omega} \left(\sum_{i=1}^{N_j} \max\{0, (y_{ji} - \tau_H)\} \right) - P_{EWA}^H b_h \end{aligned} \quad (5)$$

$$w(A_2 | R_h) = \sum_{i=1}^{b_h} \left(R_h \left(\sum_{i=1}^N X_i + X \right) + \alpha_H \sum_{i=1}^N \max\{0, (y_i - \tau_H)\} \right) - P_{EWB}^H b_h \quad (6)$$

$$w(A_3 | R_h) = \sum_{i=1}^{b_h} \left(R_h \sum_{j=1}^{\omega} \left(\sum_{i=1}^{N_j} X_{ji} + X_j \right) + \alpha_L \sum_{j=1}^{\omega} \left(\sum_{i=1}^{N_j} \max\{0, (y_{ji} - \tau_L)\} \right) \right) - P_{EWA}^L b_h \quad (7)$$

$$w(A_4 | R_h) = \sum_{i=1}^{b_h} \left(R_h \left(\sum_{i=1}^N X_i + X \right) + \alpha_L \sum_{i=1}^N \max\{0, (y_i - \tau_L)\} \right) - P_{EWB}^L b_h \quad (8)$$

$$w(A_5 | R_h) = R_h \sum_{i=1}^{b_h} \left(\sum_{i=1}^N X_i + X \right) - P_{MR}^H N b_h \quad (9)$$

$$w(A_6 | R_h) = R_h \sum_{i=1}^{b_h} \left(\sum_{i=1}^N X_i + X \right) - P_{MR}^L N b_h \quad (10)$$

其中 $h = 1, 2$, 分别指代大型医院和中小型医院 (后文同理)。

在全保方案 A_1, A_3 中, PM 服务会定期执行, 此时总延保期 T 将被划分成 ω 个 PM 执行周期, 每个长度为 T' 。医院的社会效益与接诊量成正比。用医疗设备的运行时间与设备单位时间接诊人次的乘积来计算接诊量, 因此延保期 T 内医院创造的社会效益 $\gamma(A_1) \sim \gamma(A_6)$ 可以表示为

$$\gamma(A_1 | R_1) \sim \gamma(A_3 | R_1) \propto \sum_{i=1}^{b_1} \left(\varphi_1 \sum_{j=1}^{\omega} \left(\sum_{i=1}^{N_j} X_{ji} + X_j \right) \right) \quad (11)$$

$$\gamma(A_2 | R_1) \sim \gamma(A_4 | R_1) \sim \gamma(A_5 | R_1), \quad \gamma(A_6 | R_1) \propto \sum_{i=1}^{b_1} \varphi_1 \left(\sum_{i=1}^N X_i + X \right) \quad (12)$$

$$\gamma(A_1 | R_2) \sim \gamma(A_3 | R_2) \propto \sum_{i=1}^{b_2} \left(\varphi_2 \sum_{j=1}^{\omega} \left(\sum_{i=1}^{N_j} X_{ji} + X_j \right) \right) \quad (13)$$

$$\gamma(A_2 | R_2) \sim \gamma(A_4 | R_2) \sim \gamma(A_5 | R_2), \quad \gamma(A_6 | R_2) \propto \sum_{i=1}^{b_2} \varphi_2 \left(\sum_{i=1}^N X_i + X \right) \quad (14)$$

其中 φ_1, φ_2 分别表示两类医院的医疗设备单位时间平均接诊人次。为简化表达, 令 v_H, v_L 表示延保期 T 内每台设备的延误总时长, 即

$$v_H = \begin{cases} \sum_{j=1}^{\omega} \left(\sum_{i=1}^{N_j} \max\{0, (y_{ji} - \tau_H)\} \right), & \text{若 } A_1 \\ \sum_{i=1}^N \max\{0, (y_i - \tau_H)\}, & \text{若 } A_2 \end{cases} \quad (15)$$

$$v_L = \begin{cases} \sum_{j=1}^{\omega} \left(\sum_{i=1}^{N_j} \max\{0, (y_{ji} - \tau_L)\} \right), & \text{若 } A_3 \\ \sum_{i=1}^N \max\{0, (y_i - \tau_L)\}, & \text{若 } A_4 \end{cases} \quad (16)$$

于是, 医院的期望效用函数可以表示为

$$E[U(A_1 | R_h)] = \beta_1 R_h b_h E \left[\sum_{j=1}^{\omega} \left(\sum_{i=1}^{N_j} X_{ji} + X_j \right) \right] + \beta_1 \alpha_H b_h E[v_H] - \beta_1 P_{EWA}^H b_h + \beta_2 b_h \varphi_h E \left[\sum_{j=1}^{\omega} \left(\sum_{i=1}^{N_j} X_{ji} + X_j \right) \right] \quad (17)$$

$$E[U(A_2 | R_h)] = \beta_1 R_h b_h E \left(\sum_{i=1}^N X_i + X \right) + \beta_1 \alpha_H b_h E[v_H] - \beta_1 P_{EWB}^H b_h + \beta_2 b_h \varphi_h E \left[\sum_{i=1}^N X_i + X \right] \quad (18)$$

$$E[U(A_3 | R_h)] = \beta_1 R_h b_h E \left[\sum_{j=1}^{\omega} \left(\sum_{i=1}^{N_j} X_{ji} + X_j \right) \right] + \beta_1 \alpha_L b_h E[v_L] - \beta_1 P_{EWA}^L b_h + \beta_2 b_h \varphi_h E \left[\sum_{j=1}^{\omega} \left(\sum_{i=1}^{N_j} X_{ji} + X_j \right) \right] \quad (19)$$

$$E[U(A_4 | R_h)] = \beta_1 R_h b_h E \left[\sum_{i=1}^N X_i + X \right] + \beta_1 \alpha_L b_h E[v_L] - \beta_1 P_{EWB}^L b_h + \beta_2 b_h \varphi_h E \left[\sum_{i=1}^N X_i + X \right] \quad (20)$$

$$E[U(A_5 | R_h)] = \beta_1 R_h b_h E \left[\sum_{i=1}^N X_i + X \right] - \beta_1 P_{MR}^H E[N] b_h + \beta_2 b_h \varphi_h E \left[\sum_{i=1}^N X_i + X \right] \quad (21)$$

$$E[U(A_6 | R_h)] = \beta_1 R_h b_h E \left[\sum_{i=1}^N X_i + X \right] - \beta_1 P_{MR}^L E[N] b_h + \beta_2 b_h \varphi_h E \left[\sum_{i=1}^N X_i + X \right] \quad (22)$$

2.3 制造商的利润函数

制造商的利润来自延保合同的收入, 但要扣除维保服务 (包括 PM 和 MR) 的执行成本、延误赔偿金, 以及维保队伍的运营成本。假设制造商执

行一次 PM 的平均成本是 C_{pm} , 执行一次 MR 的平均成本是 C_{mr} ; 制造商拟服务的医院总数为 $M(= M_1 + M_2)$, 并拥有 $S(\leq M)$ 支维保队伍; 制造商对维保队伍的专业化打造和运营的总成本是 S 的非线性函数 $(C_0S + C_1 S^2)$ [19]. 对于维保队伍的总运营成本, 根据两类医院所拥有的设备数量按比例进行分摊. 将制造商为全部大型医院提供延保服务所获得的利润记为 π_1 , 为全部中小型医院提供延保服务所获得的利润记为 π_2 . 例如, 如果大型医院选择方案 A_1 , 则制造商为其提供延保服务所获得的利润用 $\pi_1(A_1)$ 表示; 其余同理. 根据医院的方案选择, 可以得到制造商所获得的期望利润分别为

$$E[\pi_h(A_1)] = M_h b_h (P_{EWA}^H - C_{pm}(\omega - 1) - C_{mr} E \left[\sum_{j=1}^{\omega} N_j \right] - \alpha_H E[v_H]) - \frac{M_h b_h}{M_1 b_1 + M_2 b_2} (C_0S + C_1S^2) \quad (23)$$

$$E[\pi_h(A_2)] = M_h b_h (P_{EWB}^H - C_{mr} E[N] - \alpha_H E[v_H]) - \frac{M_h b_h}{M_1 b_1 + M_2 b_2} (C_0S + C_1S^2) \quad (24)$$

$$E[\pi_h(A_3)] = M_h b_h (P_{EWA}^L - C_{pm}(\omega - 1) - C_{mr} E \left[\sum_{j=1}^{\omega} N_j \right] - \alpha_L E[v_L]) - \frac{M_h b_h}{M_1 b_1 + M_2 b_2} (C_0S + C_1S^2) \quad (25)$$

$$E[\pi_h(A_4)] = M_h b_h (P_{EWB}^L - C_{mr} E[N] - \alpha_L E[v_L]) - \frac{M_h b_h}{M_1 b_1 + M_2 b_2} (C_0S + C_1S^2) \quad (26)$$

$$E[\pi_h(A_5)] = M_h b_h (P_{MR}^H - C_{mr}) E[N] - \frac{M_h b_h}{M_1 b_1 + M_2 b_2} (C_0S + C_1S^2) \quad (27)$$

$$E[\pi_h(A_6)] = M_h b_h (P_{MR}^L - C_{mr}) E[N] - \frac{M_h b_h}{M_1 b_1 + M_2 b_2} (C_0S + C_1S^2) \quad (28)$$

因此, 制造商的总期望利润为

$$E[\pi] = E[\pi_1] + E[\pi_2] \quad (29)$$

3 制造商和医院的博弈分析

对于医院而言, 需要从制造商提供的延保方

案中选择其一以最大化其效用. 而选择购买任一延保方案的前提是其购买后的效用必须高于不购买任何延保方案的效用.

3.1 两类医院的决策分析

医院的行动策略集为 $\{ A_0, A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6 \}$. 若医院选择 A_0 , 那么设备的运行会在第一次随机故障发生时停止, 此时将两类医院在延保期 T 内的期望效用分别表示为 $E[U(A_0 | R_1)]$ 和 $E[U(A_0 | R_2)]$. 当医院选择策略集 $\{ A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6 \}$ 中的任何一个时, 其效用均不能低于选择 A_0 时的效用. 据此可以得到医院的最高支付意愿. 令 $P_{EWA}^{c, max}$ 和 $P_{EWB}^{c, max}$ 分别表示医院愿意为全保方案甲和乙支付的最高价格, $P_{MR}^{c, max}$ 表示医院愿意为次保服务支付的最高价格, 则可知这些价格满足以下条件

$$E[U(A_1 | R_h, P_{EWA}^{h, max})] = E[U(A_0 | R_h)] \quad (30)$$

$$E[U(A_2 | R_h, P_{EWB}^{h, max})] = E[U(A_0 | R_h)] \quad (31)$$

$$E[U(A_3 | R_h, P_{EWA}^{l, max})] = E[U(A_0 | R_h)] \quad (32)$$

$$E[U(A_4 | R_h, P_{EWB}^{l, max})] = E[U(A_0 | R_h)] \quad (33)$$

$$E[U(A_5 | R_h, P_{MR}^{h, max})] = E[U(A_0 | R_h)] \quad (34)$$

$$E[U(A_6 | R_h, P_{MR}^{l, max})] = E[U(A_0 | R_h)] \quad (35)$$

制造商为了最大化其期望利润, 在定价时有多种组合. 为简化表达, 以 P_{EW}^c 表示 P_{EWA}^c 和 P_{EWB}^c 的统称; 其他符号同理. 若制造商的定价方案是 $(P_{EW}^c = P_{EW}^{c, max}, P_{MR}^c > P_{MR}^{c, max})$, 则会迫使医院购买全保方案. 对于全保方案, 若 $(P_{EWA}^c = P_{EWA}^{c, max}, P_{EWB}^c > P_{EWB}^{c, max})$, 则医院将被迫购买包含 PM 服务和故障维修的方案甲; 若 $(P_{EWA}^c > P_{EWA}^{c, max}, P_{EWB}^c = P_{EWB}^{c, max})$, 则医院将被迫购买仅包含故障维修服务的方案乙. 另外, 若 $(P_{EW}^H = P_{EW}^{H, max}, P_{EW}^L > P_{EW}^{L, max})$, 医院则会倾向于购买高优先级服务; 若 $(P_{EW}^H > P_{EW}^{H, max}, P_{EW}^L = P_{EW}^{L, max})$, 医院则会倾向于购买低优先级服务; 次保方案同理. 为方便阅读, 表 3 列举了在制造商的不同定价组合情况下两类医院的最优决策; 其中, 组合 1 的决策表示医院不购买任何延保方案; 组合 2 ~ 组合 7 为大型医院的最优决策; 组合 8 ~ 组合 13 为中小型医院的最优决策.

3.2 制造商的决策分析

制造商的决策内容包括决定各全保方案价格、次保价格、延保期、PM 服务的次数或周期,以及两类医院的服务数量. 制造商的期望利润取决于医院选择的延保方案、所服务的医院数量以及维保成本. 令 M_1^* 和 M_2^* 分别表示制造商服务的大型医院和中小型医院的最优数量; A^{1*} 和 A^{2*} 分别表示两类医院所选择的最优延保方案; π_1^* 表示制造商在最优解 M_1^* 和 A^{1*} 条件下从全部大型医院所获得的总利润; π_2^* 表示制造商在最优解 M_2^* 和 A^{2*} 条件下从全部中小型医院所获得的总利润. 于是, 在延保期 T 内制造商的最大期望利润可以表示为

$$E[\pi(P_{EWA}^H, P_{EWB}^H, P_{EWA}^L, P_{EWB}^L, P_{MR}^H, P_{MR}^L, S, \omega | A^{1*}, A^{2*}, M_1^*, M_2^*)] = E[\pi_1^*] + E[\pi_2^*] \quad (36)$$

其中 $E[\pi_1^*]$ 和 $E[\pi_2^*]$ 的计算公式, 只需根据表 3 中 A^{1*} 和 A^{2*} 的解将式 (23) ~ 式 (28) 中的 M_1 , M_2 分别用最优解 M_1^* , M_2^* 替代即可, 为节省篇幅此处不再重复.

制造商的目标是最大化其期望利润, 而根据前文可知, 制造商的期望利润与延保方案的价格 $P_{EWA}^H, P_{EWB}^H, P_{EWA}^L, P_{EWB}^L, P_{MR}^H, P_{MR}^L$ 有关, 而这些价格的确定又与两类医院的最高支付意愿有关, 因此需要分别对两类医院的最高支付意愿进行求解. 由前文可知, 这些最高支付意愿, 即 $P_{EWA}^{1, \epsilon, \max}$, $P_{EWB}^{1, \epsilon, \max}$, $P_{EWA}^{2, \epsilon, \max}$, $P_{EWB}^{2, \epsilon, \max}$, $P_{MR}^{1, \epsilon, \max}$, $P_{MR}^{2, \epsilon, \max}$ 满足

式 (30) ~ 式 (35). 当医院不购买任何延保方案时, 即选择 A_0 , 医疗设备的运行会在第一次随机故障发生时停止, 此时两类医院的期望效用分别为

$$E[U(A_0 | R_1)] = \beta_1 R_1 b_1 E[X_0] + \beta_2 b_1 \varphi_1 E[X_0] \quad (37)$$

$$E[U(A_0 | R_2)] = \beta_1 R_2 b_2 E[X_0] + \beta_2 b_2 \varphi_2 E[X_0] \quad (38)$$

其中 X_0 表示医疗设备在延保期 T 内发生第一次随机故障之前的运行时间.

根据式 (30) ~ 式 (35) 和式 (37) ~ 式 (38), 可得两类医院对 6 种延保方案的最高支付价格分别为

$$P_{EWA}^{H, \max} = \left(R_h + \frac{\beta_2}{\beta_1} \varphi_h \right) \left(E \left[\sum_{j=1}^{\omega} \left(\sum_{i=1}^{N_j} X_{ji} + X_j \right) \right] - E[X_0] \right) + \alpha_H E[v_H] \quad (39)$$

$$P_{EWB}^{H, \max} = \left(R_h + \frac{\beta_2}{\beta_1} \varphi_h \right) \left(E \left[\left(\sum_{i=1}^N X_i + X \right) \right] - E[X_0] \right) + \alpha_H E[v_H] \quad (40)$$

$$P_{EWA}^{L, \max} = \left(R_h + \frac{\beta_2}{\beta_1} \varphi_h \right) \left(E \left[\sum_{j=1}^{\omega} \left(\sum_{i=1}^{N_j} X_{ji} + X_j \right) \right] - E[X_0] \right) + \alpha_L E[v_L] \quad (41)$$

$$P_{EWB}^{L, \max} = \left(R_h + \frac{\beta_2}{\beta_1} \varphi_h \right) \left(E \left[\left(\sum_{i=1}^N X_i + X \right) \right] - E[X_0] \right) + \alpha_L E[v_L] \quad (42)$$

表 3 两类医院的最优决策

Table 3 Optimal decisions for the two classes of hospitals

组合	制造商的定价策略	医院的最优决策	决策描述
1	$P_{EW}^c > P_{EW}^{c, \max}$, $P_{MR}^c > P_{MR}^{c, \max}$	$A^{1, 2*} = A_0$	医院不购买任一延保方案
2	$P_{EWA}^H = P_{EWA}^{H, \max}$, $P_{EWB}^H > P_{EWB}^{H, \max}$, $P_{EWA}^L > P_{EWA}^{L, \max}$, $P_{EWB}^L > P_{EWB}^{L, \max}$, $P_{MR}^H > P_{MR}^{H, \max}$, $P_{MR}^L > P_{MR}^{L, \max}$	$A^{1*} = A_1$	大型医院购买高级全保方案甲

续表 3
Table 3 Continues

组合	制造商的定价策略	医院的最优决策	决策描述
3	$P_{EWA}^H > P_{EWA}^{1, H, \max}$, $P_{EWB}^H = P_{EWB}^{1, H, \max}$, $P_{EWA}^L > P_{EWA}^{1, L, \max}$, $P_{EWB}^L > P_{EWB}^{1, L, \max}$, $P_{MR}^H > P_{MR}^{1, H, \max}$, $P_{MR}^L > P_{MR}^{1, L, \max}$	$A^{1*} = A_2$	大型医院购买高级全保方案乙
4	$P_{EWA}^H > P_{EWA}^{1, H, \max}$, $P_{EWB}^H > P_{EWB}^{1, H, \max}$, $P_{EWA}^L = P_{EWA}^{1, L, \max}$, $P_{EWB}^L > P_{EWB}^{1, L, \max}$, $P_{MR}^H > P_{MR}^{1, H, \max}$, $P_{MR}^L > P_{MR}^{1, L, \max}$	$A^{1*} = A_3$	大型医院购买标准全保方案甲
5	$P_{EWA}^H > P_{EWA}^{1, H, \max}$, $P_{EWB}^H > P_{EWB}^{1, H, \max}$, $P_{EWA}^L > P_{EWA}^{1, L, \max}$, $P_{EWB}^L = P_{EWB}^{1, L, \max}$, $P_{MR}^H > P_{MR}^{1, H, \max}$, $P_{MR}^L > P_{MR}^{1, L, \max}$	$A^{1*} = A_4$	大型医院购买标准全保方案乙
6	$P_{EWA}^H > P_{EWA}^{1, H, \max}$, $P_{EWB}^H > P_{EWB}^{1, H, \max}$, $P_{EWA}^L > P_{EWA}^{1, L, \max}$, $P_{EWB}^L > P_{EWB}^{1, L, \max}$, $P_{MR}^H = P_{MR}^{1, H, \max}$, $P_{MR}^L > P_{MR}^{1, L, \max}$	$A^{1*} = A_5$	大型医院选择高级次保方案
7	$P_{EWA}^H > P_{EWA}^{1, H, \max}$, $P_{EWB}^H > P_{EWB}^{1, H, \max}$, $P_{EWA}^L > P_{EWA}^{1, L, \max}$, $P_{EWB}^L > P_{EWB}^{1, L, \max}$, $P_{MR}^H > P_{MR}^{1, H, \max}$, $P_{MR}^L = P_{MR}^{1, L, \max}$	$A^{1*} = A_6$	大型医院选择标准次保方案
8	$P_{EWA}^H = P_{EWA}^{2, H, \max}$, $P_{EWB}^H > P_{EWB}^{2, H, \max}$, $P_{EWA}^L > P_{EWA}^{2, L, \max}$, $P_{EWB}^L > P_{EWB}^{2, L, \max}$, $P_{MR}^H > P_{MR}^{2, H, \max}$, $P_{MR}^L > P_{MR}^{2, L, \max}$	$A^{2*} = A_1$	中小型医院购买高级全保方案甲
9	$P_{EWA}^H > P_{EWA}^{2, H, \max}$, $P_{EWB}^H = P_{EWB}^{2, H, \max}$, $P_{EWA}^L > P_{EWA}^{2, L, \max}$, $P_{EWB}^L > P_{EWB}^{2, L, \max}$, $P_{MR}^H > P_{MR}^{2, H, \max}$, $P_{MR}^L > P_{MR}^{2, L, \max}$	$A^{2*} = A_2$	中小型医院购买高级全保方案乙

续表 3
Table 3 Continues

组合	制造商的定价策略	医院的最优决策	决策描述
10	$P_{EWA}^H > P_{EWA}^{2H \max}$, $P_{EWB}^H > P_{EWB}^{2H \max}$, $P_{EWA}^L = P_{EWA}^{2L \max}$, $P_{EWB}^L > P_{EWB}^{2L \max}$, $P_{MR}^H > P_{MR}^{2H \max}$, $P_{MR}^L > P_{MR}^{2L \max}$	$A^{2*} = A_3$	中小型医院购买标准全保方案甲
11	$P_{EWA}^H > P_{EWA}^{2H \max}$, $P_{EWB}^H > P_{EWB}^{2H \max}$, $P_{EWA}^L > P_{EWA}^{2L \max}$, $P_{EWB}^L = P_{EWB}^{2L \max}$, $P_{MR}^H > P_{MR}^{2H \max}$, $P_{MR}^L > P_{MR}^{2L \max}$	$A^{2*} = A_4$	中小型医院购买标准全保方案乙
12	$P_{EWA}^H > P_{EWA}^{2H \max}$, $P_{EWB}^H > P_{EWB}^{2H \max}$, $P_{EWA}^L > P_{EWA}^{2L \max}$, $P_{EWB}^L > P_{EWB}^{2L \max}$, $P_{MR}^H = P_{MR}^{2H \max}$, $P_{MR}^L > P_{MR}^{2L \max}$	$A^{2*} = A_5$	中小型医院选择高级次保方案
13	$P_{EWA}^H > P_{EWA}^{2H \max}$, $P_{EWB}^H > P_{EWB}^{2H \max}$, $P_{EWA}^L > P_{EWA}^{2L \max}$, $P_{EWB}^L > P_{EWB}^{2L \max}$, $P_{MR}^H > P_{MR}^{2H \max}$, $P_{MR}^L = P_{MR}^{2L \max}$	$A^{2*} = A_6$	中小型医院选择标准次保方案

$$P_{MR}^{h, H \max} = \left(R_h + \frac{\beta_2}{\beta_1} \varphi_h \right) \frac{E \left[\left(\sum_{i=1}^N X_i + X \right) \right] - E[X_0]}{E[N]} \quad (43)$$

$$P_{MR}^{h, L \max} = \left(R_h + \frac{\beta_2}{\beta_1} \varphi_h \right) \frac{E \left[\left(\sum_{i=1}^N X_i + X \right) \right] - E[X_0]}{E[N]} \quad (44)$$

由上可见, 两类医院对于 6 种延保方案的最高支付价格 $P_{EWA}^{1, \ell \max}$, $P_{EWB}^{1, \ell \max}$, $P_{EWA}^{2, \ell \max}$, $P_{EWB}^{2, \ell \max}$, $P_{MR}^{1, \ell \max}$, $P_{MR}^{2, \ell \max}$ 取决于设备的故障时间、制造商的维修延误时间、修理时间等变量。由于所求解的问题涉及优先队列(priority queue) 所以复杂度很高, 其解析解过于复杂, 故采用基于仿真的优化方法来进行数值分析和求解^[35-37]。

4 仿真求解算法

将维修队伍看成服务台, 则待修设备接受服务的排队模型为 Weibull/M/S/∞ / $M_1 + M_2$ /FCFS; 其中各参数的涵义为: Weibull 表示每台设备的故障发生时间服从 Weibull 分布; M 表示故障维修服务的时间服从指数分布; S 表示维修队伍的数量; ∞ 表示系统容量为无穷大; $M_1 + M_2$ 表示系统中两类顾客的总数量分别为 M_1 和 M_2 ; FCFS 表示服务规则为先到先得。需要指出的是, PM 服务属于计划内的维保活动, 故执行 PM 服务的设备不进入排队系统, 制造商可以合理安排 PM 服务的执行时间。因此, 给定参数 M_1, M_2, b_1, b_2, S , 生成 $(M_1 b_1 + M_2 b_2)$ 个设备的随机故障

发生时间,则排队模型的流程图如图3所示,其算法步骤如下:

S1: 令初始时刻 $t = 0$, 一台设备离去的时刻 $t_d = \infty$ ($e = 1, 2$) 类医院选择 c 类服务时的设备 n 的初始累计故障次数为 $g_n^{e,c} = 0$, 生成 e 类医院选择 c 类服务时的设备 n 的第 m 次随机故障时点 $t_{nm}^{e,c} (t_{nm}^{e,c} < T)$;

S2: 取余下随机故障时点中的最小值, 令 $t = \min\{t_{nm}^{e,c}\}$, 当前时刻跳到最近的一次故障时刻;

S3: 判断 $t < t_d$ 是否成立; 若 $t < t_d$ 成立, 则执行 S3.1; 否则, 执行 S3.2;

S3.1: 排队系统处理到达事件:

S3.1.1: 判断 $c = H$ 是否成立; 若 $c = H$ 成立, 则说明发生故障的是高优先级设备, 令 $t_{a1} = t$, 将当前故障时刻储存在 t_{a1} , 并执行 S3.1.1(a); 否则, 令 $t_{a2} = t$, 将当前故障时刻储存在 t_{a2} , 并执行 S3.1.1(b);

S3.1.1(a): 判断队列 1 是否为空; 若是, 则跳到 S3.1.2; 否则跳到 S3.1.6;

S3.1.1(b): 判断队列 2 是否为空; 若是, 则执行 S3.1.1(a); 否则跳到 S3.1.2;

S3.1.2: 判断是否有空闲服务台; 若是, 则为当前故障设备随机分配一个空闲服务台 S ; 否则跳到 S3.1.6;

S3.1.3: 为当前服务台 S 随机生成一个修理时间 r_s , 令设备等待时间 $y = 0$, 设备离去时间 $t_d = t + r_s$;

S3.1.4: 判断 $y > \tau_c$ 是否成立; 若是, 则令 $\nu_n^{e,c} = y - \tau_c$ 储存上门延误时间; 否则直接进入 S3.1.5;

S3.1.5: 判断 $t_d < T$ 是否成立; 若是, 则令当前设备故障次数 $g_n^{e,c} = g_n^{e,c} + 1$, 记录 $g_n^{e,c}, t_{a1}, t_{a2}, \nu_n^{e,c}, t_d$, 并返回 S2; 否则循环结束;

S3.1.6: 当前设备进入相应队列等待, 令等待起始时刻 $u_n^{e,c} = t$;

S3.1.7: 记录设备停机时刻 t_{a1}, t_{a2} , 并返回 S2;

S3.2: 排队系统处理离去事件:

S3.2.1: 判断队列 1 是否为空; 若是, 则跳到 S3.2.2; 否则跳到 S3.2.3;

S3.2.2: 判断队列 2 是否为空; 若是, 则返回 S2; 否则跳到 S3.2.4;

S3.2.3: 队列 1 前端第 1 台设备随机进入空闲服务台 S , 转入 S3.2.5;

S3.2.4: 队列 2 前端第 1 台设备随机进入空闲服务台 S , 转入 S3.2.5;

S3.2.5: 为当前服务台 S 随机生成一个修理时间 r_s , 令设备等待时间 $y = t - u_n^{e,c}$, 设备离去时间 $t_d = t + y + r_s$;

S3.2.6: 判断 $y > \tau_c$ 是否成立; 若是, 则令 $\nu_n^{e,c} = y - \tau_c$ 储存上门延误时间; 否则直接进入 S3.2.7;

S3.2.7: 判断 $t_d < T$ 是否成立; 若是, 则令当前设备故障次数 $g_n^{e,c} = g_n^{e,c} + 1$, 记录 $g_n^{e,c}, \nu_n^{e,c}, t_d$, 并返回 S3; 否则循环结束.

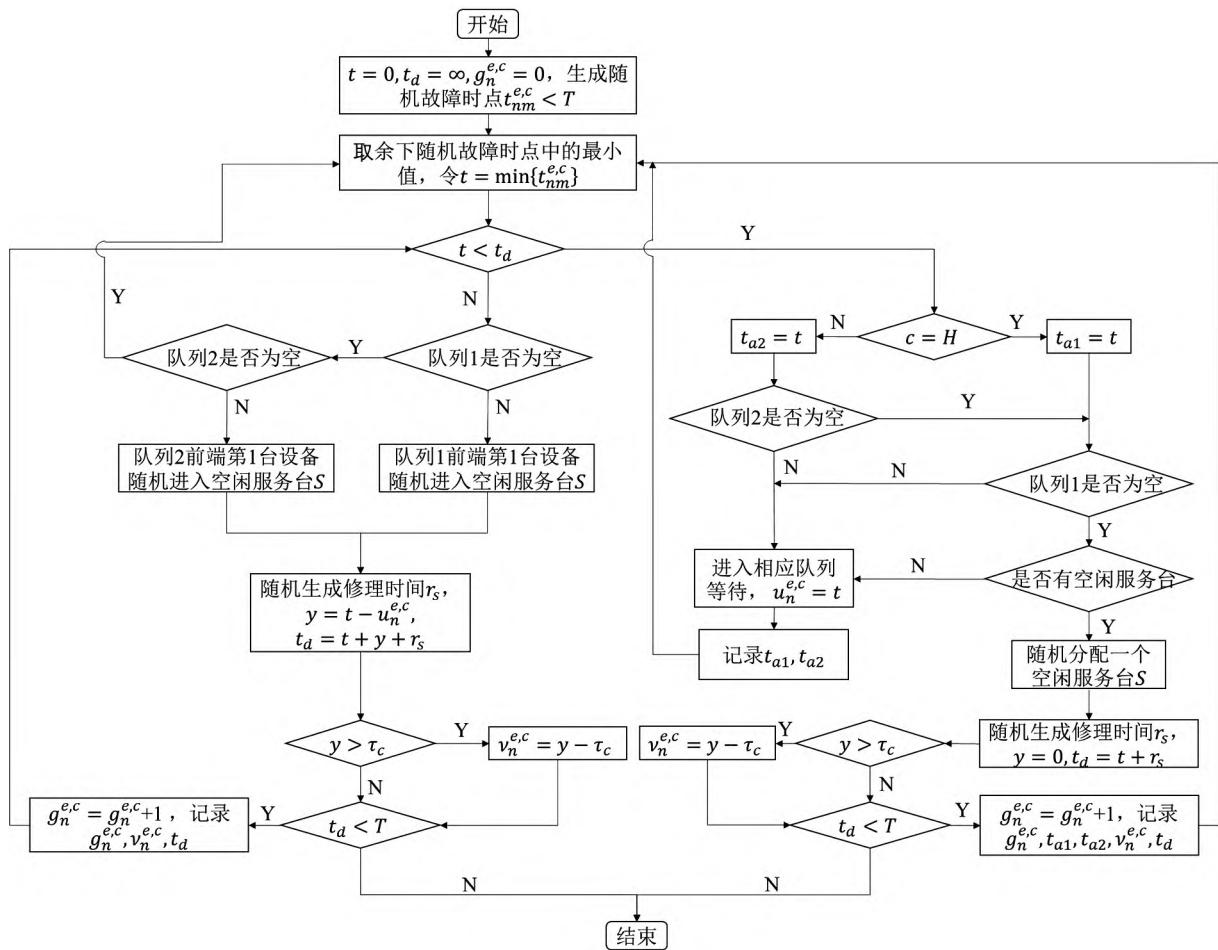


图 3 排队算法流程图

Fig. 3 Flowchart of the queuing algorithm

通过对排队模型的仿真,可以得到每一台设备的故障次数、故障时间、上门延误时间和修理时间,经过计算可得到每台设备的运行时间,代入式(39)~式(44)即可得 $P_{EWA}^{1,c,max}$, $P_{EWB}^{1,c,max}$, $P_{EWA}^{2,c,max}$, $P_{EWB}^{2,c,max}$, $P_{MR}^{1,c,max}$, $P_{MR}^{2,c,max}$ 的值. 制造商的期望利润不仅与延保方案的定价有关,还与服务的医院数量 M_1, M_2 , 以及执行 PM 服务的次数有关. 而延保方案的定价反过来也会影响顾客的选择,从而影响制造商的期望利润.

两类医院可以从 $A_1 \sim A_6$ 中选择任一延保方案,因此对于制造商来说,服务对象和服务方案的组合共有 36 种,见表 4. 可以对 36 种组合逐一进行计算,其求解算法的流程见图 4. 在每一种组合下,均可求出 M_1, M_2 和 PM 服务次数(即 $\omega - 1$)的一组最优解,并由此确定该组合下制造商的最优定价 $P_{EWA}^H, P_{EWB}^H, P_{EWA}^L, P_{EWB}^L, P_{MR}^H, P_{MR}^L$, 进而可以算出该组合下制造商的最大期望利润 $E[\pi^*]$. 比较每一组的 $E[\pi^*]$ 值,可得制造商的

表 4 两类医院的全部延保服务方案组合

Table 4 All possible choices of EW policies for the two classes of hospitals

		中小型医院					
		A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
大型医院	A_1	(A_1, A_1)	(A_1, A_2)	(A_1, A_3)	(A_1, A_4)	(A_1, A_5)	(A_1, A_6)
	A_2	(A_2, A_1)	(A_2, A_2)	(A_2, A_3)	(A_2, A_4)	(A_2, A_5)	(A_2, A_6)
	A_3	(A_3, A_1)	(A_3, A_2)	(A_3, A_3)	(A_3, A_4)	(A_3, A_5)	(A_3, A_6)
	A_4	(A_4, A_1)	(A_4, A_2)	(A_4, A_3)	(A_4, A_4)	(A_4, A_5)	(A_4, A_6)
	A_5	(A_5, A_1)	(A_5, A_2)	(A_5, A_3)	(A_5, A_4)	(A_5, A_5)	(A_5, A_6)
	A_6	(A_6, A_1)	(A_6, A_2)	(A_6, A_3)	(A_6, A_4)	(A_6, A_5)	(A_6, A_6)

最大期望利润、最优定价和 PM 服务次数. 据此可以得到不同类型的医院在均衡结果下的最优方案

选择, 并通过计算得到两类医院的最大期望效用. 具体求解算法步骤如下:

S0: 设定顾客总量 M 和 PM 次数 ρ 的上界分别为 M_{\max} ρ_{\max} ;

S1: 令初始顾客总数 $M = 1$;

S2: 令 $M_1 = M$ $M_2 = 0$;

S3: 给定 $M = M_1 + M_2$;

S4: 给定 $\rho = 0$;

S5: 进入排队模型计算 根据排队结果计算 $P_{EWA}^{1, \epsilon, \max}$ $P_{EWB}^{1, \epsilon, \max}$ $P_{EWA}^{2, \epsilon, \max}$ $P_{EWB}^{2, \epsilon, \max}$ $P_{MR}^{1, \epsilon, \max}$ $P_{MR}^{2, \epsilon, \max}$ 并由此计算 U_1 U_2 π_1 π_2 得到 $\pi = \pi_1 + \pi_2$ 记录以上结果;

S6: 判断 $\rho < \rho_{\max}$ 是否成立; 若是 则令 $\rho = \rho + 1$ 并返回 S5; 否则进入 S7;

S7: 求最大期望利润 $\pi^* = \max\{\pi\}$ 记录给定组合 $(M = M_1 + M_2)$ 下的 π^* 及其对应的 ρ $P_{EWA}^{1, \epsilon, \max}$ $P_{EWB}^{1, \epsilon, \max}$ $P_{EWA}^{2, \epsilon, \max}$ $P_{EWB}^{2, \epsilon, \max}$ $P_{MR}^{1, \epsilon, \max}$ $P_{MR}^{2, \epsilon, \max}$ U_1 U_2 ;

S8: 令 $M_1 = M_1 - 1$ $M_2 = M_2 + 1$;

S9: 判断 $M_1 < 0$ 是否成立; 若是 进入 S10; 否则返回 S3;

S10: 判断 $M < M_{\max}$ 是否成立; 若是 则令 $M = M + 1$ 并返回 S2; 否则 从 S7 记录的 π^* 中取最大值 $\max\{\pi^*\}$ 并令 $\pi_M^* = \max\{\pi^*\}$ 记录 π_M^* 及其对应的 M_1 M_2 值, 回溯 S7 记录的 ρ $P_{EWA}^{1, \epsilon, \max}$ $P_{EWB}^{1, \epsilon, \max}$ $P_{EWA}^{2, \epsilon, \max}$ $P_{EWB}^{2, \epsilon, \max}$ $P_{MR}^{1, \epsilon, \max}$ $P_{MR}^{2, \epsilon, \max}$ 即为制造商的最优决策 求解结束.

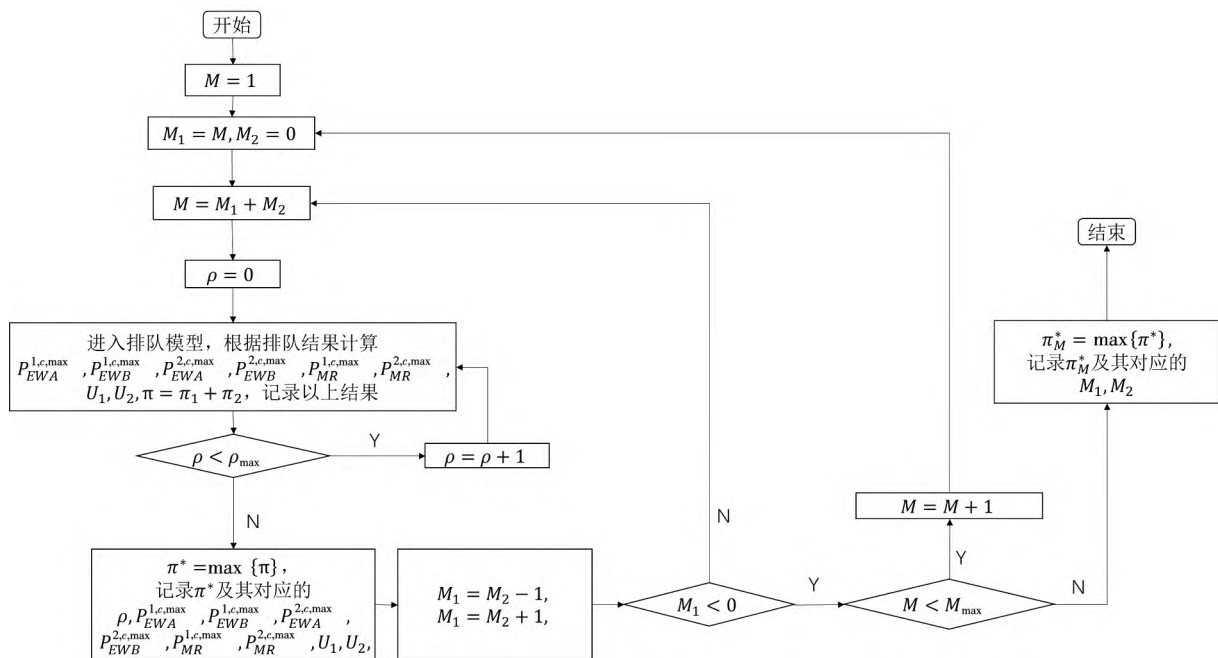


图4 决策问题的求解算法流程图

Fig. 4 Flowchart of algorithm for finding the optimal decision

5 数值算例与分析

研究参考了 Moura 等^[12] 和 Murthy and As-

gharizadeh^[19] 在数值仿真实验中的部分参数设置, 通过试验得到仿真过程的中间结果, 并据此调整其他参数值使之更加适配研究模型的基本设置. 例如, 随机选取不同的服务方案组合, 对仿真

模型进行数值试算,观察生成的设备随机故障时间列表;若列表为空,则说明设备随机故障的发生时间超出了预设的延保期 T ,应该调整参数 θ_1, θ_2, k 的值;若设备发生第一次随机故障后未能在延保期 T 内恢复运行,则说明设备的修理时间过长或维修队伍数量太少,应该调整参数 μ 或 S 的值.最终确定的仿真实验的参数设置如下: $T = 8\ 760\ \text{h}$, $k = 2$, $\theta_1 = \theta_2 = 5\ 800\ \text{h}$, $\mu = 0.02/\text{h}$, $\tau_H = 6\ \text{h}$, $\tau_L = 12\ \text{h}$, $S = 5$, $b_1 = 2, b_2 = 1$, $\sigma_p = 3\ \text{h}$, $R_1 = 0.110 (10^3\ \text{元}/\text{h})$, $R_2 = 0.105 (10^3\ \text{元}/\text{h})$, $\beta_1 = 2, \beta_2 = 3$, $\varphi_1 = 5, \varphi_2 = 3$, $\alpha_H = 1.5 (10^3\ \text{元}/\text{h})$, $\alpha_L = 0.2 (10^3\ \text{元}/\text{h})$, $C_0 = 300 (10^3\ \text{元}/\text{h})$, $C_1 = 150 (10^3\ \text{元}/\text{h})$, $C_{pm} = 3 (10^3\ \text{元}/\text{h})$, $C_{mr} = 5.4 (10^3\ \text{元}/\text{h})$. 由于本研究的问题复杂度很高,对计算资源的消耗很大(租用了 128 核云服务器),所以在仿真实验中选择了比较保守的 10 000 次重复.虽然仿真实验的结果精度会随着仿真次数的增加而提高,但通常情况下仿真重复 10 000 次是足够的,可以参见 Meeker 和 Escobar^[38] 和 Mundform 等^[39]. 在 5.3 节将对仿真实验数据进行统计分析以支持这一选择的合理性.另外,假设全部市场总共有医院 100 家;其中,大型医院与中小型医院的比例为 6:4,即 $M_1 = 60, M_2 = 40$. 同时,假设制造商在一个延保期 T 内最多提供 5 次 PM 服务.这个假设一方面是考虑现实情况,即在 1 年的延保期 T 内最多提供 5 次 PM 服务是一个合

理的假设;另一方面,根据仿真预实验的结果,最多提供 5 次 PM 服务也是一个合适的参数设置.

5.1 结果分析

基于以上的参数设置,满足表 3 医院决策条件的制造商利润最大化的结果列于表 5. 由表 5 可见,当制造商实现利润最大化时,其利润值达到 86 783 927 元;所服务的医院总数是 72 家,其中大型医院为 60 家,中小型医院为 12 家;每家大型医院和中小型医院的效用分别为 802 599 和 199 381. 此时,两类医院为其医疗设备选择的最优延保方案均为 A_1 ,即享有优先权的高级全保方案甲.在延保期内,医疗设备享有 5 次定期的 PM 服务,并在设备发生故障时享有优先接受维修服务的权利.但是,由于维修优先权只能在两类医院选择不同的服务优先级时才能体现出差异.当两类医院同时选择方案 A_1 时,这将意味着所有的医疗设备在发生故障需要排队等待维修时,实质上还是按照 FCFS 规则来接受服务的.

根据表 5 的结果,可以得到相应的各延保方案的定价或范围,见表 6. 在制造商和医院的博弈中,制造商为先行者,占主导地位.制造商为获取最大利润,通过设定 6 种延保方案的价格,使方案 A_1 的价格不高于两类医院的最高支付意愿,而其他方案的价格均高于两类医院的最高支付意愿,从而迫使两类医院均选择了延保方案 A_1 .

表 5 仿真实验结果

Table 5 Results of the simulation experiments

A_1^*	A_2^*	M^* / 间	M_1^* / 间	M_2^* / 间	PM/次	$E[U_1^*]$	$E[U_2^*]$	$E[\pi^*]$ / 元
A_1	A_1	72	60	12	5	802 599	199 381	86 783 927

表 6 延保方案定价或范围/(元)

Table 6 Pricing of the EW policies/(Yuan)

$A_1 : P_{EWA}^H$	$A_2 : P_{EWB}^H$	$A_3 : P_{EWA}^L$	$A_4 : P_{EWB}^L$	$A_5 : P_{MR}^H$	$A_6 : P_{MR}^L$
1 562 431	>3 797 140	>1 121 589	>1 030 003	>67 101	>72 678

在医院选择的最优延保方案不变的情况下,即固定 $A_1^* = A_1, A_2^* = A_1$ 不变,改变 $M, M_1/M_2$, PM 服务次数的值,对制造商的利润将有何影响呢?图 5 呈现了当 $M = 72$ 时,制造商的利润随 M_1/M_2 的变化情况.当医院的数量 $M^{\max} = 100, M_1^{\max} = 60, M_2^{\max} = 40$ 保持不变时,固定大型医院和中小型医院的总数 $M = 72$ 不变,对两类医院的

比例 M_1/M_2 进行调整,发现制造商的利润随 M_1/M_2 的增大而增大.也就是说,在制造商服务的医院总数不变的情况下,服务的大型医院越多、中小型医院越少,则获得的利润越高.表 5 显示,最优结果为 $M^* = 72, M_1^* = 60, M_2^* = 12$,此时 $M_1^* = M_1^{\max} = 60$,制造商服务的大型医院数量受限于设定的最大值.若将此上限放松,则制造商的

利润将随着 M_1 的增大而增加. 因此, 制造商的最优策略是在能力范围内服务尽可能多的大型医院以增加自己的利润.

维持医院总数 $M^{\max} = 100$, $M_2^{\max} = 40$, $M_1 = 60$, 图6呈现了制造商的利润随 M_2 的值变化而变化的情况. 当 M_2 从0增加到40时, 制造商从大型医院获得的利润 π_1 逐步减少; 从中小型医院获得的利润 π_2 则先增加后减小; 最终制造商的总利润 π 也是先增加后减小. 当维持 $M_1 = 60$ 不变的情况

下, 制造商所服务的医院已经包含大型医院60家, 随着服务的中小型医院数量 M_2 的增加, 制造商维修队伍的负荷不断增加, 待修医疗设备的排队以及排队等待时间也会相应变长, 制造商因无法在承诺的时间内上门维修而不得向医院支付更高的延误赔偿金. 换言之, 所服务的中小型医院数量的增加拉低了从大型医院获得的利润. 类似的, 制造商从中小型医院获得的利润在 M_2 增加到30以后也会因为延误赔偿金的显著增加而下降.

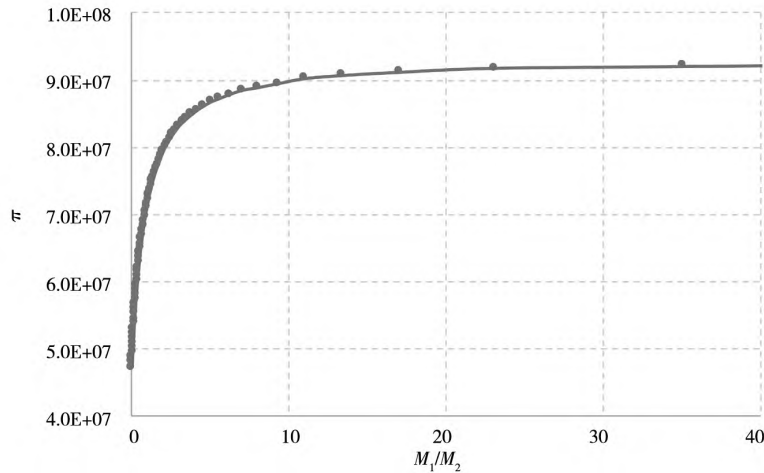


图5 制造商的利润随 M_1 / M_2 的变化 ($M = 72$)

Fig. 5 Relation between the manufacturer's profit and M_1 / M_2 ($M = 72$)

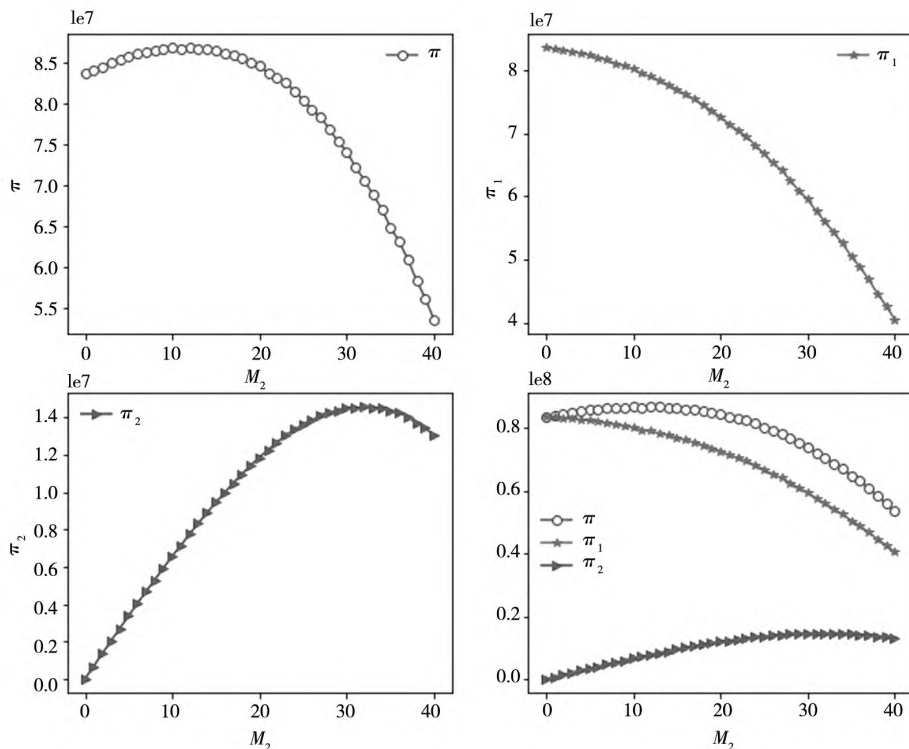


图6 制造商的利润随 M_2 的变化 ($M_1 = 60$)

Fig. 6 Relations between the manufacturer's profit and M_2 ($M_1 = 60$)

5.2 PM 服务的影响分析

随着 PM 次数的增加, 医疗设备的老化速度得到减缓, 设备的故障发生率随之下降, 因而制造商在故障维修上的支出减少, 并且由于 PM 服务的成本低于故障维修的成本, 所以制造商的总维保成本会随着 PM 次数的增加而降低. 此外, 随着设备故障发生率的降低, 待修设备的排队长度和等待时间会相应地缩短, 于是制造商因为上门延误而支付的赔偿金也会减少. 总而言之, 从理论上讲, 制造商的期望利润会随着 PM 次数的增加而增加, 但增幅会逐渐放缓. 图 7 呈现了制造商的期望利润与 PM 次数之间关系的数值仿真实验结果, 可以发现, 其与理论分析一致, 并且制造商的边际利润逐渐减少.

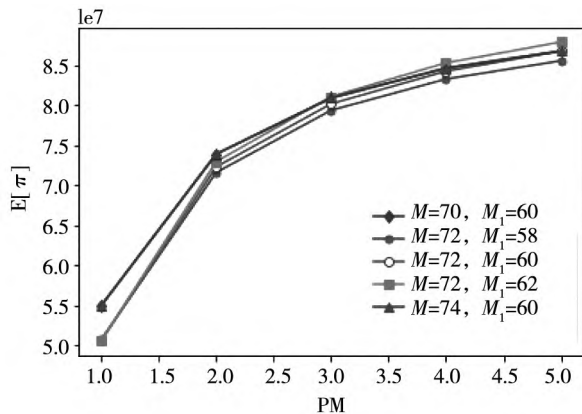


图 7 制造商的利润随 PM 次数的变化

Fig. 7 Relation between the manufacturer's profit and the number of PM services

在制造商所提供的 6 种延保方案中, 有 4 种是

只提供故障维修的方案, 即 A_2, A_4, A_5, A_6 ; 另外两种是既包括 PM 服务又包括故障维修的方案, 即 A_1, A_3 . 如果制造商仅提供故障维修服务, 则最优结果列于表 7: 制造商的利润为 67 084 581 元; 服务的大型医院为 55 家; 大型医院选择的延保方案为 A_2 或 A_5 ; 服务的中小型医院数为 0. 相应的定价策略为: A_2 定价 $P_{EWB}^H = P_{EWB}^{H, max} = 1\ 816\ 895$ 元; A_4 定价 $P_{EWB}^L > P_{EWB}^{L, max} = 843\ 705$ 元; A_5 定价 $P_{MR}^H = P_{MR}^{H, max} = 89\ 252$ 元; A_6 定价 $P_{MR}^L > P_{MR}^{L, max} = 89\ 157$ 元.

从表 7 可以看出, 提供包含 PM 服务的延保方案比不包含 PM 服务的延保方案能提高制造商的利润, 前者比后者提高了约 29%. 原因有三个方面: 其一, 如果提供 PM 服务, 制造商服务的医院最优数量为 72 家, 高于不提供 PM 服务情况下的最优数量 55 家, 客户数量的增加提高了制造商的利润; 其二, 由表 8 可知, 在延保期内, 如果没有 PM 服务, 大型医院平均每台设备发生的故障次数为 7.84 次; 如果有 PM 服务, 大型医院平均每台设备发生的故障次数将会下降到 4.57 次, 这将会降低制造商的维修成本; 其三, 由于故障维修次数的减少, 待修设备的排队长度和等待时间会相应地缩短, 从而可以减少制造商因为上门延误而支付的赔偿金. 另外, 从表 7 中还可以看到 A_1 方案 (含 PM 服务) 比 A_2 方案 (不含 PM 服务) 的定价 (即 P_1 列) 要低, 这将为医院节省成本. 可见, 包含 PM 服务的延保方案不仅能提高制造商的收益, 还能降低医院购买延保方案的成本, 最终为制造商和医院带来双赢的结果.

表 7 PM 服务的影响: 最优延保方案的对比

Table 7 Effect of PM services: Comparison of optimal EW policies

PM	A_1^*	A_2^*	M^* / 间	M_1^* / 间	M_2^* / 间	PM [*] / 次	P_1 / 元	P_2 / 元	$E[U_1^*]$	$E[U_2^*]$	$E[\pi^*]$ / 元
√	A_1	A_1	72	60	12	5	1 562 431	1 562 431	802 599	199 381	86 783 927
×	A_2	A_0	55	55	0	0	1 816 895	—	768 977	200 165	67 084 581
×	A_5	A_0	55	55	0	0	89 252	—	768 977	200 165	67 084 581

表 8 PM 服务的影响: 设备状态的对比

Table 8 Effect of PM services: Comparison of equipment performance

PM	A_1^*	A_2^*	M^* / 间	M_1^* / 间	M_2^* / 间	平均运行时间/h		平均延误时间/h		平均故障次数	
						大医院	中小医院	大医院	中小医院	大医院	中小医院
√	A_1	A_1	72	60	12	7 987	7 649	550	550	4.57	6.57
×	A_2	A_0	55	55	0	7 593	914	745	—	7.84	—
×	A_5	A_0	55	55	0	7 593	914	745	—	7.84	—

对比两种情况下制造商服务的医院的最优数量可见, 当延保方案包含 PM 服务时, 最优结果为

$M^* = 72, M_1^* = 60, M_2^* = 12$. 若制造商的延保方案仅提供故障维修而不包含 PM 服务, 则最优

结果为 $M^* = M_1^* = 55, M_2^* = 0$; 也就是说, 制造商的最佳策略是集中资源做好大型医院的延保服务, 而放弃中小型医院. 这样的结果实际上是取决于制造商维修队伍的服务能力的. 如图 8 所示, 如果增加维修队伍的数量, 则制造商服务的医院的最优数量将会有所增加.

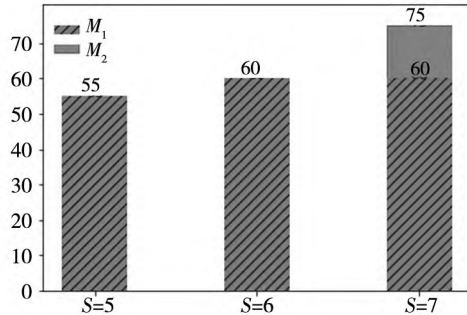


图 8 制造商服务的医院的最优数量随维修队伍的数量 S 的变化情况
Fig. 8 Relation between the optimal number of hospitals serviced by the manufacturer and the number of service teams S

5.3 仿真实验次数分析与检验

前文中选择 10 000 次的仿真重复次数进行统计分析和检验. 根据 Banks 等^[40], 仿真次数的确定应该取决于预定的误差标准, 即 $R_{ite} \geq \left(\frac{z_{\alpha/2} S_{sim}}{\varepsilon}\right)^2$; 其中 R_{ite} 表示仿真重复次数; ε 表示可接受的误差; S_{sim} 表示仿真样本的标准差. 在此, 以表 5 中的最优解, 即 $A^{1*} = A_1, A^{2*} = A_1, M^* = 72, M_1^* = 60, M_2^* = 12$, PM 次数为 5, 作为示例来进行统计分析. 为此, 将 ε 设为所仿真参数的样本均值的 0.5%. 基于 10 000 次重复的仿真结果列于表 9, 其中包括 90% 置信区间和最少仿真次数等信息. 由表 9 可见, 前文所选择的 10 000 次仿真重复次数是完全足够的.

表 9 仿真实验次数与精度分析

Table 9 Analysis of the number of simulation replications

	P_1 /元	P_2 /元	运行时间		故障次数	
			大医院	中小医院	大医院	中小医院
样本均值	1 562 431	1 562 431	7 987	7 649	4.57	6.57
样本标准差 S_{sim}	411 905	411 905	298.4	438.4	0.15	0.57
90% H_{CI}	6 775	6 775	4.91	7.21	0.002 5	0.009 4
最少仿真次数 R_{ite}	7 522	7 522	151	355	122	822

注: 1) “90% H_{CI} ”表示 90% 置信区间的一半宽度; 2) S_{sim} 表示 10 000 次重复得到的样本标准差.

6 结束语

聚焦于医疗设备延期保修情境下制造商和医院之间关于最优延保策略和定价进行的博弈和决策问题. 研究显著改进了前人的研究, 丰富了医疗设备延保方案的设计, 并考虑了设备的预防性检修这一重要的售后服务选项. 制造商为医院提供 6 种延保方案, 医院可以任选一种, 也可以选择购买任何延保服务. 在医疗设备售后服务市场上, 由于受各种条件的制约, 医院依赖于制造商提供延保服务, 故采用了 Stackelberg 模型分析制造商和医院之间的博弈, 并基于制造商利润最大化和医院效用最大化求得均衡解. 由于模型更贴近现实所以复杂度很高, 需要借助仿真优化技术来进

行求解.

研究发现, 制造商的最优策略是在自己维保队伍的能力范围内尽可能服务更多的大型医院以提高自己的利润; 而两类医院作为 Stackelberg 博弈的跟随者, 其最优策略是选择包括 PM 服务并享有维修优先权的全保方案以实现效用最大化. 另一方面, 对于医疗设备的延保问题, 包含 PM 服务和故障维修的策略相对于仅提供故障维修的策略来说是一个帕累托改进. 前者可以同时提高制造商的利润并降低医院购买延保方案的成本. 因此, 制造商和医院应将设备的预防性检修作为一项标准实践予以推广.

关于本研究的进一步拓展方向, 可从以下几个方面来考虑: 1) 对医院数量的上限和维修队伍数量的关系进行研究; 2) 分析大型医院和

中小型医院的比例对维修定价、制造商利润和医院效用的影响; 3) 考虑信息不对称性, 采用信号博弈对医院和制造商之间的博弈行为进行研究.

参考文献:

- [1] DeCroix G A. Optimal warranties, reliabilities and prices for durable goods in an oligopoly [J]. *European Journal of Operational Research*, 1999, 112(3): 554 – 569.
- [2] Murthy D N P, Blischke W R. Strategic warranty management: A life-cycle approach [J]. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 2000, 47(1): 40 – 54.
- [3] Thomas M U, Rao S S. Warranty economic decision models: A summary and some suggested directions for future research [J]. *Operations Research*, 1999, 47(6): 807 – 820.
- [4] Murthy D N P, Djamaludin I. New product warranty: A literature review [J]. *International Journal of Production Economics*, 2002, (79): 231 – 260.
- [5] Shafiee M, Chukova S. Maintenance models in warranty: A literature review [J]. *European Journal of Operational Research*, 2013, 229(3): 561 – 572.
- [6] Darghouth M N, Ait-kadi 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.
- [7] Liu Z, Diallo C, Chen J, et al. Optimal pricing and production strategies for new and remanufactured products under a non-renewing free replacement warranty [J]. *International Journal of Production Economics*, 2020, (226): 107602.
- [8] Cha J H, Finkelstein M, Levitin G. Optimal warranty policy with inspection for heterogeneous, stochastically degrading items [J]. *European Journal of Operational Research*, 2021, 289(3): 1142 – 1152.
- [9] De Vivo L, Derrico P, Tomaiuolo D, et al. Evaluating Alternative Service Contracts for Medical Equipment [C]. *Proceedings of the 26th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, San Francisco: 2004, September 1 – 5, 3485 – 3488.
- [10] Bollapragada S, Gupta A, Lawsirirat C. Managing a portfolio of long term service agreements [J]. *European Journal of Operational Research*, 2007, (182): 1399 – 1411.
- [11] Cruz A M, Rincon A M R. Medical device maintenance outsourcing: Have operation management research and management theories forgotten the medical engineering community?: A mapping review [J]. *European Journal of Operational Research*, 2012, 221(1): 186 – 197.
- [12] Moura C, Mateus J, López E, et al. Analysis of extended warranties for medical equipment: A Stackelberg game model using priority queues [J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2017, (168): 338 – 354.
- [13] Blumberg D F. New Strategic Directions in Acquiring and Outsourcing High-Tech Services by Hospitals and Implications for Clinical Engineering Organizations and ISOs. In: *Clinical Engineering Handbook* [M]. San Diego: Elsevier Academic Press, 2004: 137 – 147.
- [14] 王文娟, 王季冬. 过度医疗与转诊制: 一个排队论下的博弈模型 [J]. *管理科学学报*, 2019, 22(2): 63 – 76.
Wang Wenjuan, Wang Jidong. Overtreatment and referral systems: A game embedded in a queuing model [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2019, 22(2): 63 – 76. (in Chinese)
- [15] 叶光亮, 王世强, 陈逸豪. 混合所有制改革与最优专利授权——基于不对称信息的寡头博弈 [J]. *管理科学学报*, 2019, 22(11): 54 – 68.
Ye Guangliang, Wang Shiqiang, Chen Yihao. Mixed-ownership reform and optimal licensing: Oligopoly game with information asymmetry [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2019, 22(11): 54 – 68. (in Chinese)
- [16] 曹 柬, 赵韵雯, 吴思思, 等. 考虑专利许可及政府规制的再制造博弈 [J]. *管理科学学报*, 2020, 23(3): 1 – 23.
Cao Jian, Zhao Yunwen, Wu Sisi, et al. Remanufacturing game with patent protection and government regulation [J].

- Journal of Management Sciences in China ,2020 ,23(3) : 1 – 23. (in Chinese)
- [17]周晓晗,张江华,徐进. 基于序贯博弈的企业研发合作动机研究[J]. 管理科学学报,2021 ,24(2) : 111 – 126.
Zhou Xiaohan ,Zhang Jianghua ,Xu Jin. Research on the motivation for R&D cooperation between firms based on sequential game [J]. Journal of Management Sciences in China ,2021 ,24(2) : 111 – 126. (in Chinese)
- [18]Jackson C ,Pascual R. Optimal maintenance service contract negotiation with aging equipment [J]. European Journal of Operational Research ,2008 ,(189) : 387 – 398.
- [19]Murthy D N P ,Asgharizadeh E. Optimal decision making in a maintenance service operation [J]. European Journal of Operational Research ,1999 ,(116) : 259 – 273.
- [20]Ashgarizadeh E ,Murthy D N P. Service contracts: A stochastic model [J]. Mathematical and Computer Modelling ,2000 ,(31) : 11 – 20.
- [21]Esmaeili M ,Shamsi G N ,Asgharizadeh E. Three-level warranty service contract among manufacturer ,agent and customer: A game-theoretical approach [J]. European Journal of Operational Research ,2014 ,239(1) : 177 – 186.
- [22]Wang J ,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.
- [23]Fang C C. Optimal price and warranty decision for durable products in a competitive duopoly market [J]. Reliability Engineering & System Safety ,2020 ,(203) : 107068.
- [24]Murthy D N P ,Blischke W R. Warranty Management and Product Manufacture [M]. London: Springer Verlag ,2005.
- [25]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.
- [26]Bouguerra S ,Chelbi A ,Rezq N. A decision model for adopting an extended warranty under different maintenance policies [J]. International Journal of Production Economics ,2012 ,135(2) : 840 – 849.
- [27]Chang W L ,Lin J H. Optimal maintenance policy and length of extended warranty within the life cycle of products [J]. Computers and Mathematics with Applications ,2012 ,63(1) : 144 – 150.
- [28]Su C ,Shen J. Analysis of extended warranty policies with different repair options [J]. Engineering Failure Analysis ,2012 ,(25) : 49 – 62.
- [29]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.
- [30]Djameludin I ,Murthy D N P ,Kim C S. Warranty and preventive maintenance [J]. International Journal of Reliability , Quality and Safety Engineering ,2001 ,8(2) : 89 – 107.
- [31]Kim C S ,Djameludin I ,Murthy D N P. Warranty and discrete preventive maintenance [J]. Reliability Engineering and System Safety ,2004 ,84(3) : 301 – 309.
- [32]Huang Y S ,Yen C. A study of two-dimensional warranty policies with preventive maintenance [J]. IIE Transactions ,2009 ,41(4) : 299 – 308.
- [33]Elsayed E A. Reliability Engineering [M]. 3rd Edition ,Hoboken: Wiley ,2020.
- [34]Bourke J ,Roper S. The influence of experiential learning on medical equipment adoption in general practices [J]. Health Policy ,2014 ,(118) : 37 – 47.
- [35]Alrabghi A ,Tiwari A. State of the art in simulation-based optimisation for maintenance systems [J]. Computers & Industrial Engineering ,2015 ,(82) : 167 – 182.
- [36]Li N ,Stanford D A. Multi-server accumulating priority queues with heterogeneous servers [J]. European Journal of Operational Research ,2016 ,252(3) : 866 – 878.
- [37]Afsahi M ,Shafiee M. A stochastic simulation-optimization model for base-warranty and extended-warranty decision-making of under-and out-of-warranty products [J]. Reliability Engineering & System Safety ,2020 ,(197) : 106772.
- [38]Meeker W Q ,Escobar L A. Statistical Methods for Reliability Data [M]. New York: John Wiley & Sons ,1998.

- [39] Mundform D J , Schaffer J , Kim M J , et al. Number of replications required in Monte Carlo simulation studies: A synthesis of four studies [J]. *Journal of Modern Applied Statistical Methods* , 2011 , 10(1) : 19 – 28.
- [40] Banks J , Carson II J S , Nelson B L , et al. *Discrete-Event System Simulation* [M]. 5rd Edition , England: Harlow , Pearson Education , 2014.

Optimal design and pricing of extended warranty policy for medical equipment: A game-theory approach

ZHANG Cai-wen , TAN Qing-yuan

School of Business , SunYat-sen University , Guangzhou 510275 , China

Abstract: This paper is focused on the decision-making problems involved in designing and pricing extended warranty (EW) policies for medical equipment. Compared with previous studies , we offer more flexible and realistic EW policies for hospitals to choose. An important improvement on previous research is that preventive maintenance (PM) services are incorporated as part of the EW policies. Hospitals are classified into two groups , namely large general hospitals and small and medium ones. For various reasons such as technical expertise , spare parts availability and intellectual property protection , repair and maintenance services for medical equipment are usually monopolized by the manufacturer. Therefore , a Stackelberg game , where the manufacturer is the leader and the hospitals are the follower , is adopted to model the decision process between them. A Weibull/ $M/S/\infty/M_1 + M_2$ /FCFS queuing model is used to simulate the service processes. The optimization problem is constructed based on maximizing the profit of the manufacturer and maximizing the utilities of the hospitals. By use of simulation-based optimization , we can obtain the equilibrium solution. The main findings include: 1) The optimal strategy for the manufacturer is to service as many large general hospitals as the capacity of the maintenance teams allows to maximize its profit; 2) The optimal strategy for the hospitals is to choose the warranty policy that includes both PM and failure repairs with priority for service to maximize their utilities; 3) A warranty policy offering both PM and failure repairs , compared with one offering only failure repairs , is a Pareto improvement. As a result , PM services should be adopted as standard practice in medical equipment post-sales services.

Key words: medical equipment; extended warranty; preventive maintenance; Stackelberg game; queuing model