

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107490

绩效保障策略下多目标维修决策优化研究*

朱曦, 胡起伟, 白永生, 温亮, 李娟

(中国人民解放军陆军工程大学石家庄校区装备指挥与管理系 石家庄 050003)

摘要:基于绩效的保障作为一种新的保障策略, 现已被广泛地应用在航空、国防和能源等领域。本文针对具有两阶段退化过程的单部件系统, 在功能检测模型的基础上, 将供应商的收益与可用度相关联, 构建了收益率与利润率函数, 并建立了基于绩效保障的维修决策模型。通过汽轮机叶片的算例分析对模型的有效性进行了验证, 结果表明, 本文采用的策略与费用最小化策略相比利润提高了 2.19%, 可用度上升了 0.079%; 与可用度最大化策略相比利润提高了 26.61%, 费用减少了 13.35%, 证明了绩效保障策略可以同时满足多个目标需求, 以较低的费用实现利润最大化并改善系统的性能。最后, 分别对故障后维修费用和停机时间进行了灵敏度分析, 有助于最佳检测间隔期和最佳利润率的确定。

关键词: 基于绩效的保障; 维修决策; 功能检测; 检测间隔期; 多目标优化

中图分类号: TH17 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 520.6

Research on optimization of multi-objective maintenance decision under performance-based logistics strategy

Zhu Xi, Hu Qiwei, Bai Yongsheng, Wen Liang, Li Juan

(Department of Equipment Command and Management, Shijiazhuang Campus of Army Engineering University of PLA, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: The performance-based logistics is a new support strategy, which has been widely applied in aviation, defense, energy, etc. Based on the functional check model for the single component system with two-stage failure process, this paper establishes the revenue rate and profit rate function through associating the supplier's revenue and availability. The maintenance decision model is formulated based on the performance-based logistics. Then, the effectiveness of the model is evaluated through a numerical example of steam turbine blades. Compared with the cost minimization, results show that the profit and availability of the proposed policy are increased by 2.19% and 0.079%, respectively. Compared with the availability maximization, the profit is increased by 26.61% and the cost is reduced by 13.35%. These results prove that the proposed policy can achieve multi-objective requirements at the same time. The profit could be maximized and the system performance could be improved at a lower cost. Finally, the sensitivity analysis of maintenance cost and downtime is carried out, which is helpful to determine the optimal inspection interval and profit rate.

Keywords: performance-based logistics; maintenance decision; functional check; inspection interval; multi-objective optimization

0 引言

随着科学技术的进步与制造需求的提升, 生产设备逐渐大型化、系统化和自动化, 这类设备通常有一些共同的特点: 运营维护成本高、连续工作时间长以及停机损失大^[1]。因此, 生产厂家每年都要投入大量的资金和人力

物力在设备维护上^[2]。文献[3]认为设备用于维护保养的费用大约占到全寿命周期费用的 60% 以上, 极大地影响了系统的总体运行成本。

传统保障策略下, 用户购买单个零部件或单次修理活动, 供应商根据交易数量收取费用^[4]。这种模式导致供应商缺乏动力推动材料、技术和流程的创新^[5], 用户可能面临设备系统老旧带来的产品竞争力低、维护保障难

收稿日期: 2020-02-06 Received Date: 2020-02-06

* 基金项目: 国家自然科学基金(71871220)项目资助

和人力成本高等问题。近年来,基于绩效的保障(performance-based logistics, PBL),也称为基于性能的保障,作为一种新的保障策略出现在国防、航空和能源等领域。PBL最早源自美国军方,是以具有清晰权责界限的长期绩效合同所确立的保障结构,将保障作为一种综合的、经济可承受的“性能包”来购买,从而优化系统的战备完好性,实现武器系统的性能目标^[6]。尽管在不同领域叫法不同,但其本质是相同的,即购买绩效结果,而不是购买单个零部件或维修服务。

近几年,PBL 相关的研究逐渐增多,但主要集中在风险、激励、框架、合同和绩效指标等方面^[7-12],有关优化决策方面的研究相对较少。Nowicki 等^[13]研究了 PBL 策略下的备件供应问题,提出了线性和指数两种收益函数;Kim 等^[14]将单地点的备件库存管理问题嵌入到由单个委托人和多个相互依赖的代理人组成的委托代理模型中,研究了售后服务供应链中的合同问题,表明在无法观察到供应商的行为且用户与供应商都处于风险中立状态时,最好采用基于绩效的保障合同和固定价格合同;Mirzahasseinian 等^[15]研究了 PBL 策略下的闭环可修复备件库存系统,表明与系统可靠性以及维修设备的效率相比,备件库存水平对系统的可用度没有重大影响;Mirzahasseinian 等^[16]研究了单级可修复库存模型,在考虑集群规模的前提下,专注于可靠性的提高,表明可修复库存系统中零部件的可靠性是集群规模和服务率的函数,进一步拓展了委托代理模型;Hur 等^[17]研究了 PBL 策略下,飞机在寿命周期末期的备件库存控制问题。由上述分析可以看出,PBL 已经成为当前研究的热点问题,相关研究成果对于推动 PBL 的应用和发展产生了重要作用。然而,PBL 在维修领域的学术研究还相对匮乏,且研究方向主要聚焦在备件库存领域,在维修决策方面的应用还十分鲜见。

本文首先对研究的问题进行了描述,做了合理的假设,然后计算了功能检测条件下的费用与可用度,并建立了绩效保障策略下的维修决策模型,接着通过实验验证与结果分析证明了建立模型的有效性和优越性,最后对模型参数的敏感度进行分析,研究了故障后维修费用和停机时间对最佳检测间隔期和利润率的影响,为使用设备的用户和设备及保障服务的供应商共同实施 PBL 提供了借鉴参考。

1 问题描述与建模假设

1.1 问题描述

功能检测是一种通过定期检测确定产品的状态参数是否在规定限度内的预防性维修工作^[18]。这种维修策略认为故障不是瞬发的,而是一个逐渐退化的过程,

如果能在这一过程中发现故障,就可以采取措施避免故障或减小故障后果。功能检测模型正是基于这一认识,将产品分为正常、缺陷和故障三种状态,通过定期检测识别产品状态并采取相应的维护措施,其目的是通过数学模型来确定检测间隔期 T 以满足不同优化目标的需求。

本文基于功能检测模型,研究针对如图 1 所示的具有两阶段退化过程的单部件系统。其第一阶段是从系统开始运行直到缺陷发生时刻 u ,称为正常运行阶段;第二阶段是从缺陷发生时刻 u 到故障发生时刻 $u+h$,称为故障延迟阶段, h 为故障延迟时间。传统的功能检测模型中,通常以维修费用最小或可用度最大为优化目标,对功能检测间隔期 T 进行优化,即单目标优化决策模型。如果在绩效保障策略下对功能检测进行优化决策,其决策目标不仅要考虑用户对支付费用、可用度等要求,而且要考虑供应商的利润、激励措施等情况,即供应商在一定的资金条件下满足用户对系统可用度、任务完成率等绩效指标的要求,并尽可能使自己的利润最大。因此,与传统的功能检测模型相比,PBL 策略下功能检测模型的优化决策属于多目标优化问题,需要通过利润在费用和绩效指标这两个相互制约的目标间求出最优解,这也正是本文要研究的问题。

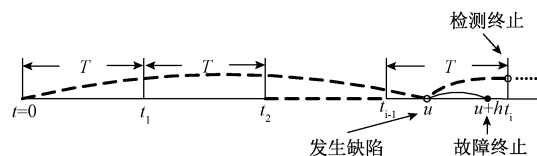


图 1 单部件系统功能检测过程

Fig. 1 Functional check process of the single-unit system

1.2 建模假设

为了在合理的条件下建立模型,现对单部件系统做如下假设:

- 1) 本文研究的单部件系统只受一种支配性故障的影响;
- 2) 缺陷发生时刻 u 和故障延迟时间 h 都服从威布尔分布,其形状参数分别为 α_1, α_2 ,尺度参数分别为 β_1, β_2 ,概率密度函数如式(1)、(2)所示:

$$g(u) = \frac{\alpha_1}{\beta_1} \left(\frac{u}{\beta_1}\right)^{\alpha_1-1} e^{-\left(\frac{u}{\beta_1}\right)^{\alpha_1}} \quad (1)$$

$$f(h) = \frac{\alpha_2}{\beta_2} \left(\frac{h}{\beta_2}\right)^{\alpha_2-1} e^{-\left(\frac{h}{\beta_2}\right)^{\alpha_2}} \quad (2)$$

- 3) 正常运行阶段和故障延迟阶段是两个相互独立的过程;

- 4) 在 t_i 时刻进行检测, $t_i = (i-1)T$, ($i=1, 2, \dots$),其中 T 代表重复检测间隔期;

5) 如果检测时发现缺陷就进行故障更换、原件修复等预防性维修, 否则产品将继续工作直到下一次检测或发生故障;

6) 检测是完美且无损的, 所有维修活动也是完美的, 经过维修后的系统会恢复为全新状态。

需要说明的是: 当正常运转和故障延迟两个阶段故障机理未发生变化时, 两阶段之间是有影响的。但实际上很多情况下两个阶段并不是完全一致的, 如: 第一阶段是轻微磨损, 当磨损到一定程度后, 强度降低, 开始出现微小裂纹, 然后进入第二阶段断裂过程, 这两个阶段的故障机理是不同的, 故可将这两个过程看作是独立的。

2 模型的建立

2.1 功能检测条件下费用与可用度的计算

根据更新报酬 (renewal reward) 理论, 参考文献[18], 无限使用期下产品单位时间的费用 $C(T)$ 和平均可用度 $A(T)$ 可以表示为:

$$C(T) = EC/ET \quad (3)$$

$$A(T) = (ET - ED)/ET \quad (4)$$

其中, EC 为寿命周期内的期望费用, ED 为寿命周期内的期望停机时间, ET 为寿命周期的期望长度。

根据建模假设已知, 检测是完美的, 如果在检测时存在缺陷就能被检测出来。如果在检测间隔期内产生缺陷, 则该缺陷有可能在下次检测前劣化为故障或在下次检测时被发现。

假设缺陷发生在 $(u, u + du)$, $t_{i-1} < u < t_i$, 则产品寿命可能结束于故障或在检测时缺陷被发现, 针对前者进行故障后维修, 后者则进行预防性维修。在检测时刻 t_i 前发生故障后维修的概率为 $g(u) \cdot du \cdot F(t_i - u)$, 在检测时发生故障后预防性维修的概率为: $g(u) \cdot du \cdot [1 - F(t_i - u)]$ 。

在 (t_{i-1}, t_i) 上对 u 积分, 可以得到在 (t_{i-1}, t_i) 上发生故障后维修的概率, $P_b(t_{i-1}, t_i)$ 可以表示为:

$$P_b(t_{i-1}, t_i) = \int_{t_{i-1}}^{t_i} g(u) F(t_i - u) du \quad (5)$$

$$C(T) = \frac{\sum_{i=1}^{\infty} \{ [(i-1)C_{ins} + C_f] \cdot P_b(t_{i-1}, t_i) + (iC_{ins} + C_p) \cdot P_m(t_i) \}}{\sum_{i=1}^{\infty} \int_{t_{i-1}}^{t_i} \int_0^{t_i-u} \{ (u+h)g(u)f(h) dh du + t_i \cdot P_m(t_i) \}} \quad (13)$$

$$A(T) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{\infty} \{ [(i-1)T_{ins} + T_f] \cdot P_b(t_{i-1}, t_i) + (iT_{ins} + T_p) \cdot P_m(t_i) \}}{\sum_{i=1}^{\infty} \int_{t_{i-1}}^{t_i} \int_0^{t_i-u} \{ (u+h)g(u)f(h) dh du + t_i \cdot P_m(t_i) \}} \quad (14)$$

t_i 时刻发生预防性维修的概率 $P_m(t_i)$ 为:

$$P_m(t_i) = \int_{t_{i-1}}^{t_i} g(u) [1 - F(t_i - u)] du \quad (6)$$

如果故障后维修发生在 (t_{i-1}, t_i) 内的 $u + h$ 时刻, 则此产品的寿命周期为 $u + h$, 在寿命周期中的总费用为 $(i-1)C_{ins} + C_f$, 总停机时间为 $(i-1)T_{ins} + T_f$ 。同理, 如果在 t_i 时刻发生了预防性维修, 则此产品的寿命周期为 t_i , 寿命周期中的总费用为 $iC_{ins} + C_p$, 总停机时间为 $iT_{ins} + T_p$ 。其中, C_{ins} 为检测费用, C_p 为预防性维修费用, C_f 为故障后维修费用, T_{ins} 为检测停机时间, T_p 为预防性维修停机时间, T_f 为故障后维修停机时间。

因此, 缺陷发生在间隔期 (t_{i-1}, t_i) 内任意时刻情况下的产品寿命周期期望费用为:

$$EC(t_{i-1}, t_i) = [(i-1)C_{ins} + C_f] \cdot P_b(t_{i-1}, t_i) + (iC_{ins} + C_p) \cdot P_m(t_i) \quad (7)$$

寿命周期期望停机时间为:

$$ED(t_{i-1}, t_i) = [(i-1)T_{ins} + T_f] \cdot P_b(t_{i-1}, t_i) + (iT_{ins} + T_p) \cdot P_m(t_i) \quad (8)$$

寿命周期期望长度为:

$$ET(t_{i-1}, t_i) = \int_{t_{i-1}}^{t_i} \int_0^{t_i-u} (u+h)g(u)f(h) dh du + t_i \cdot P_m(t_i) \quad (9)$$

综合所有可能的间隔期包括初始点 $(i=1, 2, \dots)$, 可以得到产品在寿命周期内的期望费用为:

$$EC = \sum_{i=1}^{\infty} EC(t_{i-1}, t_i) = \sum_{i=1}^{\infty} \{ [(i-1)C_{ins} + C_f] \cdot P_b(t_{i-1}, t_i) + (iC_{ins} + C_p) \cdot P_m(t_i) \} \quad (10)$$

寿命周期期望停机时间为:

$$ED = \sum_{i=1}^{\infty} ED(t_{i-1}, t_i) = \sum_{i=1}^{\infty} \{ [(i-1)T_{ins} + T_f] \cdot P_b(t_{i-1}, t_i) + (iT_{ins} + T_p) \cdot P_m(t_i) \} \quad (11)$$

寿命周期期望长度为:

$$ET = \sum_{i=1}^{\infty} ET(t_{i-1}, t_i) = \sum_{i=1}^{\infty} \int_{t_{i-1}}^{t_i} \int_0^{t_i-u} \{ (u+h)g(u)f(h) \cdot dh du + t_i \cdot P_m(t_i) \} \quad (12)$$

因此, 长时间使用条件下单位时间的期望费用和平均可用度可以表示为:

2.2 绩效保障策略下维修决策建模

在传统功能检测优化模型中,通常以维修费用最小或可用度最大为优化目标,而 PBL 通过利润将绩效、费用和收益等多个目标整合到一个统一的目标中去,以利润最大进行优化。其中,绩效指标对于成功实施 PBL 来说至关重要,选择和制定的绩效指标应当可以促进性能改进、效率的提高和创新方法的应用,同时,绩效指标也要满足“具体、可测量、可实现、相关性和及时性”的要求。为此,这里结合维修保障实践,选择可用度作为绩效指标,可用度代表装备系统处于可工作或可使用状态的概率,是装备使用部门最关心的重要参数之一^[19]。

这里将供应商的期望收益率与系统长时间使用条件下的平均可用度相关联,建立期望收益率 $ER(T)$ 的模型,如式(15)所示。

$$ER(T) = \begin{cases} 0, & A(T) < A_{min} \\ \pi + \theta \times [A(T) - A_{min}], & A(T) \geq A_{min} \end{cases} \quad (15)$$

其中, A_{min} 为 PBL 合同中规定的最低可用度,低于该值将无法获得收益; π 和 θ 是由供应商与用户在签订 PBL 合同时商定的参数, π 代表可用度达到 A_{min} 后供应商可获得的最小收益, θ 代表奖励程度,通过与可用度超出 A_{min} 的部分相乘,可以得到奖励收益 $\theta \times [A(T) - A_{min}]$ 。

结合长时间使用条件下单位时间的期望费用和期望收益率,这里将利润率 $EP(T)$ 表示为:

$$EP(T) = ER(T) - C(T) \quad (16)$$

根据式(15)和(16)可知,在参数确定时,利润 $EP(T)$ 中的奖励收益 $\theta \times [A(T) - A_{min}]$ 与可用度直接相关,供应商若想获得最佳利润,不仅要降低维修费用,而且要尽可能的提高可用度,对费用与可用度进行综合权衡。因此,在 PBL 策略下,将整合了绩效、费用和收益等多个目标的期望利润率作为优化目标,建立维修决策模型如式(17)所示。其中, T^* 代表利润率最大时对应的最优检测间隔期。

$$\begin{aligned} \max EP(T) &= ER(T) - EC(T) \\ T^* &= \operatorname{argmax} \{ EP(T) \} \\ \text{s. t. } &0 < T \leq T_{max} \end{aligned} \quad (17)$$

为了体现 PBL 策略的优势,这里给出了两个比较策略,即费用最小化和可用度最大化策略。

费用最小化策略是以维修费用 $C(T)$ 为优化目标,对重复检测间隔期为优化对象进行优化,通过获得最优检测间隔期使费用最小化,其维修决策模型如式(18)所示。

$$\begin{aligned} \min C(T) \\ T^* &= \operatorname{argmin} \{ C(T) \} \\ \text{s. t. } &0 < T \leq T_{max} \end{aligned} \quad (18)$$

可用度最大化策略是以可用度 $A(T)$ 为优化目标,对

重复检测间隔期进行优化,通过获得最优检测间隔期使可用度最大化,其维修决策模型如式(19)所示。

$$\begin{aligned} \max A(T) \\ T^* &= \operatorname{argmax} \{ A(T) \} \\ \text{s. t. } &0 < T \leq T_{max} \end{aligned} \quad (19)$$

2.3 优化求解算法

为了求解不同策略下的最优检测间隔期 T^* ,本文设计了如图 2 所示的枚举优化算法,并通过 MATLAB 对算法进行编程以求得最优解。首先,输入威布尔分布参数、

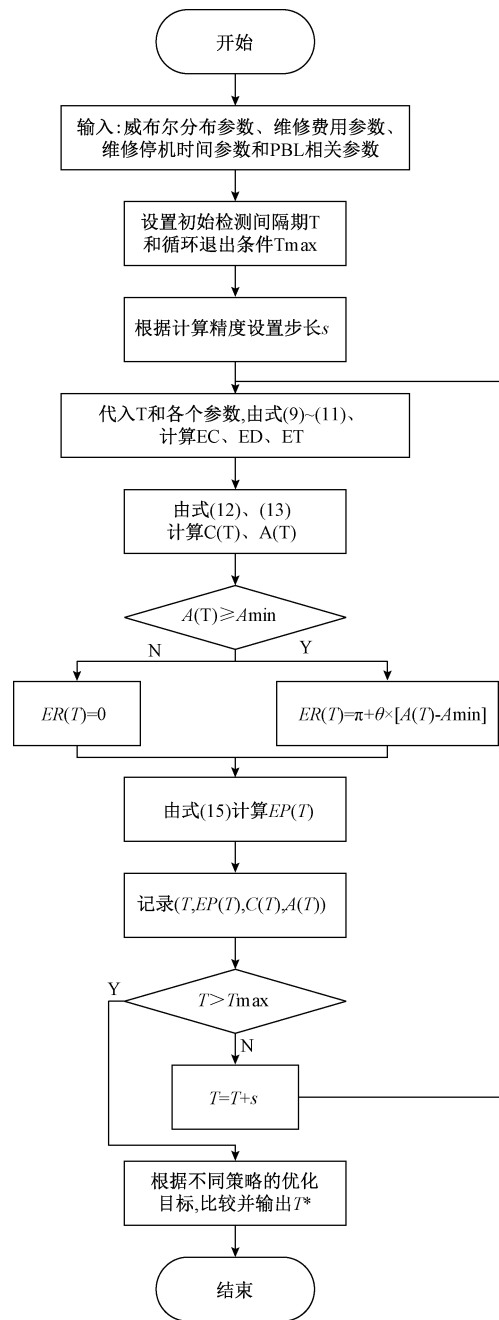


图 2 枚举优化算法流程图

Fig. 2 Flow chart of the enumeration optimization algorithm

维修费用参数、维修停机时间参数和 PBL 相关参数;然后,设置初始检测间隔期 T 以及循环退出条件 T_{max} 的大小,并根据计算精度的需求设置步长 s ;其次,将 T 和各个参数代入前文中的模型开始循环直至退出,并记录每次循环 T 对应的 $EP(T)$ 、 $C(T)$ 和 $A(T)$;最后,根据不同策略的优化目标,比较并输出最优检测间隔期 T^* 。

3 实验验证与结果分析

汽轮机是一种以蒸汽为动力,并将蒸气产生的热能转化为机械功的旋转机械,是现代火力发电厂中应用最广泛的原动机。叶片作为汽轮机的关键零件,又是最精细、最重要的零件之一,维修费用和维修时间远高于其它部件,其能否安全可靠的运行对生产十分重要,直接影响产能和经济效益。鉴于叶片的重要性,需要通过定期检测判断是否存在裂纹,如果在检测中发现裂纹,就要对叶片实施预防性维修,如果存在裂纹而没有被发现就很可能引起汽轮机故障。

在对算例进行求解之前,先预设威布尔分布参数、维修费用参数和维修停机时间参数,数值根据历史维修信息和检测数据给出,具体参数如表 1~3 所示。其中,为了下文进行的灵敏度分析,本文将维修参数中的检测费用、预防性维修费用、检测停机时间和预防性维修停机时间等参数固定不变,选择不同的故障后维修费用和故障后维修停机时间以探究不同故障后果对最佳检测间隔期和最佳利润率的影响。

表 1 威布尔分布参数

Table 1 Parameters of Weibull distribution

α_1	β_1	α_2	β_2
1.5	36	1.5	12

表 2 维修费用参数

Table 2 Parameters of maintenance cost 元

C_{ins}	C_p	C_f
200	1 000	5 000/7 500/10 000

表 3 维修停机时间参数

Table 3 Parameters of maintenance downtime 月

T_{ins}	T_p	T_f
0.1	0.2	1.5/2/2.5

在预设了威布尔分布参数和维修参数的基础上,对 PBL 策略的相关参数进行设置。将系统的最低可用度 A_{min} 设置为 0.95,并为收益函数选择合理的参数,其中 $\pi = 100$ 元, $\theta = 2 000$ 。再根据前面的假设和模型,将各个

参数代入进行求解,利润最大化、费用最小化和可用度最大化策略下的优化结果分别如表 4~6 所示。

表 4 利润最大化策略下的优化结果

Table 4 The optimization results under profit maximization strategy

C_i	C_p	C_f	T_i	T_p	T_f	利润最大化				
						T	C	A	P	
200	1 000	5 000	0.1	0.2	1.5	9.6	72.74	0.976 2	79.8	
						2.0	8.8	72.52	0.973 1	73.76
						2.5	8.2	72.58	0.970 4	68.23
200	1 000	7 500	0.1	0.2	1.5	7.9	85.43	0.975 5	65.63	
						2.0	7.5	84.95	0.972 8	60.68
						2.5	7.2	84.69	0.970 3	56.04
200	1 000	10 000	0.1	0.2	1.5	7	95.57	0.974 6	53.81	
						2.0	6.7	94.94	0.972 2	49.52
						2.5	6.5	94.59	0.97	45.42

注: C 代表维修费用, A 代表可用度, P 代表利润率。

表 5 费用最小化策略下的优化结果

Table 5 The optimization results under cost minimization strategy

C_i	C_p	C_f	T_i	T_p	T_f	费用最小化				
						T	C	A	P	
200	1 000	5 000	0.1	0.2	1.5	8.7	72.51	0.975 9	79.46	
						2.0	8.7	72.51	0.973 1	73.76
						2.5	8.7	72.51	0.970 2	68.06
200	1 000	7 500	0.1	0.2	1.5	6.7	84.52	0.974 3	64.1	
						2.0	6.7	84.52	0.972 2	59.93
						2.5	6.7	84.52	0.970 1	55.77
200	1 000	10 000	0.1	0.2	1.5	5.8	94.04	0.972 7	51.43	
						2.0	5.8	94.04	0.970 9	47.94
						2.5	5.8	94.04	0.969 2	44.45

根据表 4 和 5 的优化结果,对 PBL 策略和费用最小化策略进行对比分析。结果显示,在参数相同的情况下,相比费用最小化策略,虽然 PBL 策略下的维修费用略高,但可用度更高,所获利润也更多。明显的,当 $C_{ins} = 200$, $C_p = 1 000$, $C_f = 10 000$, $T_{ins} = 0.1$, $T_p = 0.2$, $T_f = 2.5$ 时, PBL 策略与传统的费用最小化策略相比,尽管维修费用增加了 0.59%,但利润提高了 2.19%,同时可用度也上升了 0.079%。

根据表 4 和 6 的优化结果,对 PBL 策略和可用度最大化策略进行对比分析。结果显示,在参数相同的情况下,相比可用度最大化策略,虽然 PBL 策略的可用

表 6 可用度最大化策略下的优化结果

Table 6 The optimization results under availability maximization strategy

C_i	C_p	C_f	T_i	T_p	T_f	可用度最大化				
						T	C	A	P	
200	1 000	5 000	0.1	0.2	1.5	10.9	73.63	0.976 4	79.17	
						2.0	8.9	72.53	0.973 1	73.75
						2.5	7.8	72.77	0.970 4	68.12
200	1 000	7 500	0.1	0.2	1.5	10.9	91.97	0.976 4	60.84	
						2.0	8.9	87.16	0.973 1	59.12
						2.5	7.8	85.29	0.970 4	55.59
200	1 000	10 000	0.1	0.2	1.5	10.9	110.3	0.976 4	42.5	
						2.0	8.9	101.79	0.973 1	44.49
						2.5	7.8	97.82	0.970 4	43.07

度较低,但所用费用更少,所获利润率也更高。明显的,当 $C_{ins} = 200, C_p = 1 000, C_f = 10 000, T_{ins} = 0.1, T_p = 0.2, T_f = 1.5$ 时,PBL 策略与可用度最大化策略相比,可用度仅下降了 0.18%,但利润率提高达 26.61% 之多,同时费用也减少了 13.35%。

在上述对比分析的基础上,通过与维修保障的实际情况相结合,可以得出以下结论:

1) 供应商不断降低维修费用以期获得最佳利润的策略是不可取的。传统保障模式下,供应商通常通过降低维修费用的办法来提高利润率,但结果表明,这样做并不能获得最佳利润,反而可能造成产品性能和质量下降,损害用户利益。在 PBL 策略下,供应商与用户商定固定价格、奖励程度和最低可用度等参数,通过签订 PBL 合同的方式,既提高了产品性能,又确保了自身利润。

2) 供应商忽略费用因素,仅通过提高可用度提高收益,进而获得最佳利润的策略是不可取的。应该在保证最低可用度的前提下,合理地在费用与可用度之间进行权衡,这样才能获得最佳利润。

4 灵敏度分析

为探究 PBL 策略下最优检测间隔期和利润率的变化趋势,本文通过改变相关参数分析最优决策对故障后维修费用和故障后停机时间的敏感程度。

1) 故障后维修费用 C_f 对最优维修策略的影响。图 3 描述了当 $C_{ins} = 200, C_p = 1 000, T_{ins} = 0.1, T_p = 0.2, T_f = 2.5$,变动 C_f 对最佳检测间隔期 T 和最佳利润率 P 的影响。图 3 中曲线上的数字代表 PBL 策略下, C_f 取不同值时的最佳检测间隔期及其对应的利润率,例如,(8.2, 68.24)代表 $C_f = 5 000$ 时,最佳检测间隔期为 8.2 个月,

最佳利润率为 68.24 元/月。

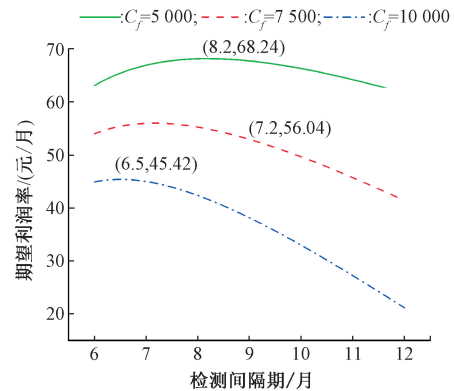


图 3 最优维修策略对于故障后维修费用的敏感性分析
Fig. 3 Sensitivity analysis of optimal maintenance strategy to corrective repair cost

从图 3 可以看出:1) 故障后维修费用 C_f 对最佳检测间隔期 T 和最佳利润率 P 影响明显,总体来说,随着 C_f 的增大,最佳利润率 P 逐渐减小;2) 当故障后维修费用 C_f 较小时,最佳检测间隔期 T 较大,因为此时系统的故障后维修费用较小,故障后的损失相对较低,不需要对系统频繁检测;3) 当 C_f 较大时, T 较小,这样做有利于及时了解系统的退化状态,如果存在问题,可以及时实施维修活动降低故障损失。

2) 故障后停机时间 T_f 对最优维修策略的影响。图 4 描述了当 $C_{ins} = 200, C_p = 1 000, C_f = 7 500, T_{ins} = 0.1, T_p = 0.2$,变动 T_f 对最佳检测间隔期 T 和最佳利润率 P 的影响。图 4 中曲线上的数字代表 PBL 策略下, T_f 取不同值时的最佳检测间隔期及其对应的利润率,例如,(7.9, 65.63)代表 $T_f = 1.5$ 时,最佳检测间隔期为 7.9 个月,最佳利润率为 65.63 元/月。

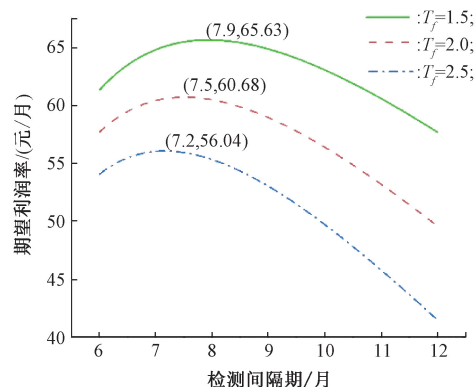


图 4 最优维修策略对于故障后停机时间的敏感性分析
Fig. 4 Sensitivity analysis of optimal maintenance strategy to downtime after failure

从图 4 可以看出:1) 故障后停机时间 T_f 对最佳检测

间隔期 T 和最佳利润率 P 影响比较明显,随着 T_f 的增大,最佳利润率 P 逐渐减小;2)当故障后停机时间 T_f 较小时,最佳检测间隔期 T 较大,故障后恢复速度较快,因此不需要进行频繁检测;3)当 T_f 较大时, T 较小,因为这样做有利于在发生缺陷时能够及时发现,保证了系统的可用度。

5 结 论

本文针对具有两阶段退化过程的单部件系统,研究了基于绩效的保障策略对维修决策的影响。在功能检测模型的基础上,构建了收益率和利润率函数,建立了 PBL 策略下的维修决策模型,同时给出了费用最小化和可用度最大化两种策略的模型,通过数值例子和敏感度分析检验了方法的有效性。根据全文的研究,可以得出如下结论:

1)PBL 策略不同于传统优化策略,其以利润为优化目标的方式可以更好地权衡费用与可用度,求出最优解。

2)从灵敏度分析可以看出,故障后维修费用和故障后停机时间对最佳检测间隔期和最佳利润率有一定的影响,供应商和用户可以根据故障所造成的后果合理地设定参数。

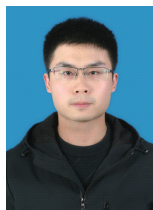
3)PBL 作为一种新的保障策略,有一定的应用价值,本文为进一步研究和实施 PBL 提供了借鉴参考。

参考文献

- [1] 年夫顺. 关于故障预测与健康管理技术的几点认识 [J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(8): 1-14.
NIAN F SH. Viewpoints about the prognostic and health management [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(8): 1-14.
- [2] 张国珺, 史元浩. 考虑最小成本的风机轴承维护周期优化 [J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(2): 48-55.
ZHANG G J, SHI Y H. Optimization of wind turbine bearing maintenance cycle based on minimum cost [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2019, 33(2): 48-55.
- [3] KUMAR U D, CROCKER J. 可靠性、维修性与后勤保障—寿命周期方法 [M]. (刘庆华, 宋宁哲, 刘根, 等, 译). 北京: 电子工业出版社, 2010.
KUMAR U D, CROCKER J. Reliability, maintenance and logistics support—A life cycle approach [M] (LIU Q H, SONG N ZH, LIU G, et al, trans.) Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010.
- [4] PATRA P. Analysing performance-based contract for manufacturing systems using absorbing state Markov chain [J]. International Journal of Advanced Operations Management, 2017, 9(1): 37-56.
- [5] NOWICKI D, RANDALL W S, GOROD A. A framework for performance based logistics: A system of systems approach [C]. 2010 International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT 2010), 2010: 681-692.
- [6] 赵元立, 丛红日, 胡小兵. 基于性能的保障理论与方法 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2019.
ZHAO Y L, CONG H R, HU X B. Performance based logistics theory and method [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2019.
- [7] GLAS A H, RAITHEL C, ESSIG M. Risk perception in performance based contracts and the influence of experience [J]. International Journal of Productivity and Performance Management, 2019, 68(6): 1078-1101.
- [8] JING H, TANG L C. A risk-based approach to managing performance-based maintenance contracts [J]. Quality and Reliability Engineering International, 2017, 33(4): 853-865.
- [9] NEELY J H A. Investigating risks of outcome-based service contracts from a provider's perspective [J]. International Journal of Production Research, 2017, 56(6): 2103-2115.
- [10] GLAS A H, KLEEMANN F C. Performance-based contracting: Contextual factors and the degree of buyer supplier integration [J]. Journal of Business & Industrial Marketing, 2017, 32(5): 677-692.
- [11] BÖHM E, BACKHAUS C, EGGERT A, et al. Understanding outcome-based contracts: Benefits and risks from the buyers' and sellers' perspective [J]. Journal of Strategic Contracting and Negotiation, 2016, 2(1-2): 128-149.
- [12] SELVIARIDIS K, NORRMAN A. Performance-based contracting for advanced logistics services [J]. International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, 2015, 45(6): 592-617.
- [13] NOWICKI D, KUMAR U D, STEUDEL H J, et al. Spares provisioning under performance-based logistics contract: profit-centric approach [J]. Journal of the Operational Research Society, 2008, 59(3): 342-352.
- [14] KIM S, COHEN M A, NETESSINE S. Performance contracting in after-sales service supply chains [J]. Management Science, 2007, 53(12): 1843-1858.

- [15] MIRZAHOSSEINIAN H, PIPLANI R. A study of repairable parts inventory system operating under performance-based contract [J]. *European Journal of Operational Research*, 2011, 214(2): 256-261.
- [16] MIRZAHOSSEINIAN H, PIPLANI R, JIN T. The impact of fleet size on performance-based incentive management [J]. *Journal of the Operational Research Society*, 2017, 67(2): 165-175.
- [17] HUR M, KESKIN B B, SCHMIDT C P. End-of-life inventory control of aircraft spare parts under performance based logistics [J]. *International Journal of Production Economics*, 2018, 204: 186-203.
- [18] 贾希胜. 以可靠性为中心的维修决策模型[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
JIA X SH. The decision models for reliability centered maintenance [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007.
- [19] 甘茂治, 康建设, 高崎. 军用装备维修工程学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
GAN M ZH, KANG J SH, GAO Q. Military equipment maintenance engineering [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005.

作者简介



朱曦, 2019 年于中国人民解放军陆军工程大学获得学士学位, 现为陆军工程大学硕士研究生, 主要研究方向为装备维修工程理论与应用。

E-mail: zxtalk@126.com

Zhu Xi received his B.Sc. degree from Army Engineering University of PLA in 2019. He is currently a master student at Army Engineering University of PLA. His main research interests include equipment maintenance engineering theory and application.



温亮(通信作者), 2003 年于军械工程学院获得学士学位, 2006 年于军械工程学院获得硕士学位, 现为陆军工程大学讲师, 主要研究方向为维修决策建模。

E-mail: Lwenmark@163.com

Wen Liang (Corresponding author) received his B.Sc. degree and M.Sc. degree both from Ordnance Engineering College in 2003 and 2006, respectively. He is currently an lecturer at Army Engineering University. His main research interest is maintenance decision modeling.