

引用格式: 张杰, 刘炎, 李天匀, 等. 延寿不确定性下疲劳损伤结构的维修策略分析 [J]. 中国舰船研究, 2023, 18(4): 233–241.

ZHANG J, LIU Y, LI T Y, et al. Maintenance strategy analysis of fatigue-sensitive structure under service life extension uncertainty[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2023, 18(4): 233–241.

延寿不确定性下疲劳损伤结构的 维修策略分析



扫码阅读全文

张杰¹, 刘炎^{*}, 李天匀¹, 卢忆文²

1 华中科技大学 船舶与海洋工程学院, 湖北 武汉 430074

2 中国舰船研究设计中心, 湖北 武汉 430064

摘要: [目的] 为降低船舶延寿不确定性的影响以及未来延寿期间的疲劳风险, 采取基于实物期权分析方法的动态维修序列决策。[方法] 以高速船舶的局部疲劳为例, 在船舶服役前期加强维修, 在后期根据延寿要求确定适应性维修决策, 以适应未来可能出现的各种延寿可能性。[结果] 结果显示, 与传统的维修策略相比, 实物期权分析下的灵活决策能够减小延寿不确定性的影响, 有效降低船舶延寿期间的失效风险。[结论] 采用实物期权分析方法制定的序列决策对于未来出现的延寿不确定性具有很强的适应性, 可为维修决策提供一种新的思路。

关键词: 疲劳损伤; 延寿不确定性; 维修管理; 实物期权分析; 灵活性

中图分类号: U672.7

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.02786

Maintenance strategy analysis of fatigue-sensitive structure under service life extension uncertainty

ZHANG Jie¹, LIU Yan¹, LI Tianyun¹, LU Yiwen²

1 School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

2 China Ship Development and Design Center, Wuhan 430064, China

Abstract: [Objectives] In order to reduce the influence of ship service life extension uncertainty and fatigue risk during future service life extension, a dynamic maintenance sequence decision based on the real option analysis method is adopted. [Methods] The local fatigue of a high-speed ship is taken as an example. This strategy strengthens the maintenance in the early stages of the ship's service and determines the adaptive maintenance decision according to the requirements of service life extension in the later stages, thereby adapting to the various possibilities of service life extension in the future. [Results] Compared with the traditional maintenance strategy, the flexible decision under real option analysis can reduce the influence of service life extension uncertainty and effectively reduce failure risk during service life extension. [Conclusions] The sequential decision made via the real option analysis method has strong adaptability to the uncertainty of service life extension in the future and provides a new idea for maintenance decisions.

Key words: fatigue damage; uncertainty of service life extension; maintenance management; real option analysis; flexibility

收稿日期: 2022-01-27 修回日期: 2022-04-22 网络首发时间: 2023-07-20 14:59

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51839005); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(HUST: 2020kfyXJJS047)

作者简介: 张杰, 女, 1996年生, 硕士。研究方向: 可靠性与可维修性及综合保障技术。E-mail: zhangjieamanda@163.com

刘炎, 男, 1988年生, 博士, 副教授。研究方向: 可靠性与可维修性及综合保障技术。

E-mail: yanliuch@hust.edu.cn

李天匀, 男, 1969年生, 博士, 教授。研究方向: 船舶与海洋工程结构力学。E-mail: ltyz801@hust.edu.cn

卢忆文, 男, 1989年生, 硕士, 高级工程师

*通信作者: 刘炎

0 引 言

服役中的船舶结构会因疲劳等而出现退化,在船体结构进入老龄化阶段后,这种不断退化的机制有可能会造成停机抢修甚至是重大的海损事故^[1-2]。此外,因购置新船的时间成本和经济成本均较高,所以超出设计寿命的船舶被继续使用的现象越来越普遍^[3]。据统计,目前有超过 40% 的船舶和大量海洋平台的实际寿命已超过其初始设计使用寿命^[4-6],所以,在全生命周期管理过程中还需要考虑船舶的延寿。但是,只考虑确定性设计使用寿命的维修策略无法保证延寿期间的可靠性,很难适应不同的延寿要求。为此,本文拟提出实物期权分析的方法,该方法可以根据未来延寿的不确定性灵活进行维修决策,能够适应未来不同的延寿要求。

当前,国内外学者已提出几种用来确定退化结构最优维修策略的概率方法。Soliman 等^[7]为寻找最优维修方案,将概率疲劳裂纹扩展方法引入到了优化方法中; Garbatov 等^[8]提出了一种基于可靠性的船舶结构维修规划优化方法; Yang 等^[9]提出了一种基于动态贝叶斯网络和影像图的生命周期管理框架;程俭达等^[10]提出基于马尔科夫链建立多状态退化系统模型,利用强化学习方法训练产生维修策略的代理,从而在自适应学习过程中得到最优维修策略。上述概率方法可为维修管理者提供一种经济、有效的检查和维修策略,以维持结构的安全性能,但是该类方法只考虑了设计使用寿命内的固定优化,且仅靠满足设计阈值和减少投资与风险来估计维修决策,难以灵活应对未来的延寿不确定性。

在处理基础设施管理中的不确定性时,灵活性的价值受到了学者们的关注。Mandelbaum 和 Buzacott^[11]基于决策理论背景提出了一个灵活性框架,认为在一个二阶问题中,灵活性的定义是在第 1 阶段作出决定后,在第 2 阶段仍然开放的选择决策。一般来说,维修管理决策主要是估计多次维修的维修时间和维修干预类型,以确保结构承受损伤机制时的安全性能^[12]。把维修管理的序列决策看作是一个多阶问题,固定维修决策之外的更多剩余选择反映了增加的灵活性。

实物期权分析方法能够为维修管理提供一种适应未来延寿不确定性的灵活决策方式。实物期权起源于金融市场,Black 和 Scholes^[13]提供了用于评估金融资产的理论公式。如今,实物期权不仅是基础设施投资的估值工具,还逐渐被应用到

一些工程领域和基础设施系统的设计中。例如, Knight 等^[14]将实物期权理论抽象为以性能需求为导向的基于前景的实物期权理论,将其应用到了船舶初始设计阶段的结构优化中; Hino 等^[15]将实物期权理论用到了应对气候变化的防洪堤设计中; Gersonius 等^[16]将实物期权理论用到了城市排水管理的适应性策略构建中。以上研究将实物期权分析拓展到船体结构的运维中,为维修管理提供了一种新的思路与方法。

在 2020 IALCCE 会议上,笔者首次提出了基于实物期权分析方法的维修决策^[17],该策略是在初始设计寿命内得到的,没有考虑延寿不确定性。因此,本文拟在此基础上进行延伸与拓展。首先,对维修措施的类型进行拓展;其次,对于作为对照的固定维修策略,也考虑其延寿的概率模型;再次,在确定维修时间和维修干预类型时,考虑未来延寿的不确定性,并根据不同的延寿要求予以灵活决策;最后,为了验证改进后的疲劳维修管理的实物期权分析方法,对比分析考虑概率延寿的固定维修策略以及实物期权分析下的灵活性决策框架,主要用于制定疲劳损伤结构适应未来延寿不确定性的灵活维修策略、评估实物期权分析在处理延寿不确定性的收益和灵活性方面的价值。

1 实物期权分析方法

1.1 方法概述

实物期权分析在维修管理中的应用考虑了多种延寿要求的影响,可以适应未来的延寿不确定性。在初期制定维修管理计划时,通常难以考虑到未来延寿的不确定性,而实物期权分析方法则可以加强维修管理初期的维修干预,在后期确定考虑不同延寿要求的灵活决策。实物期权分析在维修管理中的应用可以降低延寿不确定性的影响,增加维修决策的灵活性,提高结构延寿期间的可靠性能。本文拟采用的维修管理的实物期权分析方法的流程图如图 1 所示。

首先,确定裂纹扩展的概率模型和维修模型等不确定性模型后,通过蒙特卡洛仿真得到相应的风险因子;然后,固定延寿要求,考虑其延寿的概率分布,并以全生命周期费用为目标函数进行优化,从而得到固定设计使用寿命内的维修策略;接着,将实物期权理论应用到维修管理中,得到实物期权分析下的灵活维修策略;最后,在不同延寿要求下,对比计算不同维修策略的可靠性指标,评估实物期权分析方法的期权价值和灵活

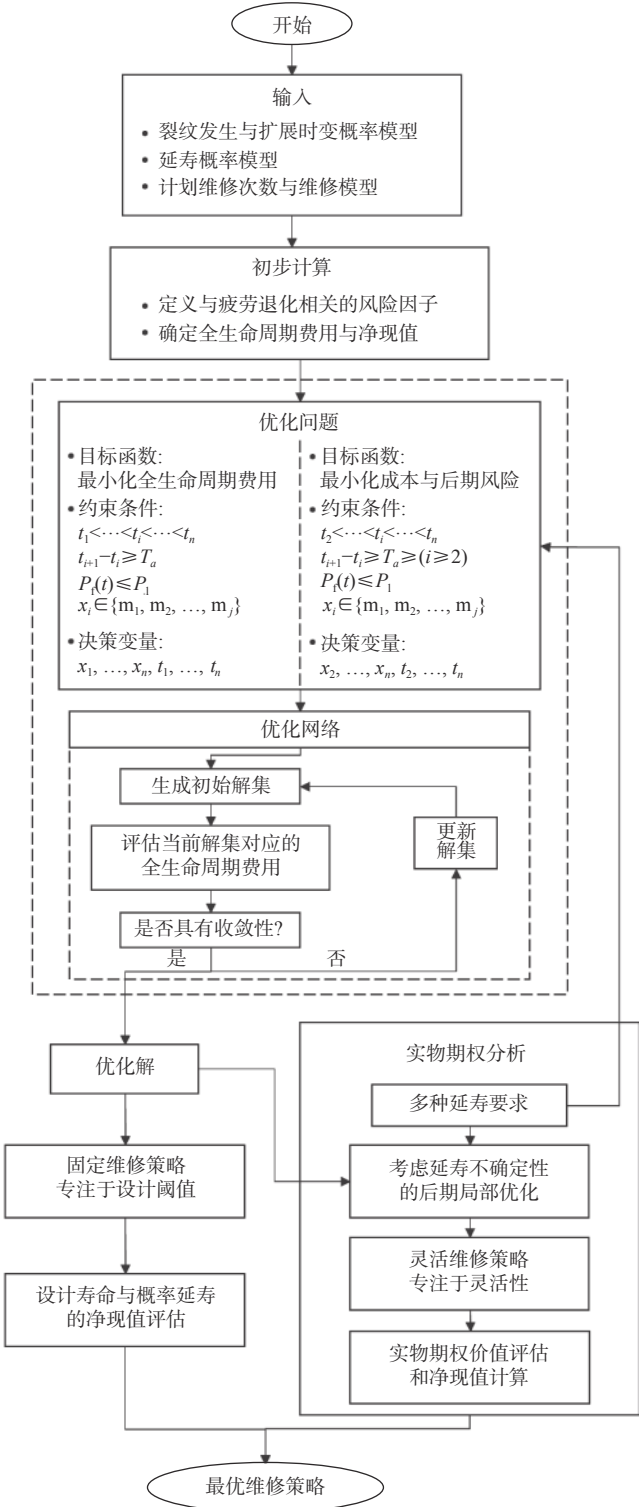


图 1 维修管理的实物期权分析流程图

Fig. 1 Real option analysis flowchart of maintenance management

性, 为船舶生命周期管理者进行动态分析和复杂决策提供有利的参考。

1.2 评估实物期权

一般来说, 评估不同维修策略主要考虑可靠性和经济性 2 个方面。其中, 可靠性可以采用失效风险来表示, 而失效风险可以表示为失效概率与其后果的乘积; 全生命周期成本、期权价值等

则作为衡量不同维修策略的经济性指标。将灵活维修策略比固定维修决策多的全生命周期成本定义为实物期权价格 K , 可以表示为

$$K=\max(0,LCC^{\text{ro}}-LCC)$$

(1)

式中, LCC^{ro} , LCC 分别为灵活维修策略和固定维修策略下的全生命周期费用。

将灵活维修策略在延寿期间的风险降低水平

定义为期权收益 Φ ,也即灵活维修策略相比固定维修策略降低的失效风险^[17]:

$$\Phi = \sum_{t_{life}}^{(t_{life}+t_{est})} (R_f(t) - R_f^{ro}(t)) \tag{2}$$

式中: t_{life} 为船舶设计寿命; t_{est} 为船舶延长的寿命; $R_f(t)$, $R_f^{ro}(t)$ 分别为固定维修策略和灵活维修策略的失效风险,对应于失效概率与失效费用的乘积。

由实物期权分析方法得到的灵活维修策略,能够适应未来的各种延寿要求,可有效提高维修管理的灵活性。在这里,灵活性指对未来延寿不确定性的适应性,将灵活性量化为延寿期间灵活决策相比固定决策所增加的价值^[18],即可表示为

$$F = \max(R_{fest}(t_{life} + t_{est}) - eR_{fest}(t_{life} + t_{est}), 0) \tag{3}$$

式中, $eR_{fest}(t)$, $R_{fest}(t)$ 分别指不同延寿要求下灵活维修策略和固定维修策略在延寿期间最大失效风险的平均值。灵活性也可以用灵活性的相对价值 F_R 来衡量^[18],即可以表示为

$$F_R = \frac{F}{eR_{fest}(t_{life} + t_{est})} \tag{4}$$

2 量化不确定性模型

2.1 疲劳损伤概率模型

在工程上,线弹性断裂力学方法主要被用来研究缺陷结构的疲劳裂纹扩展,这种方法主要与应力强度因子、材料属性、应力幅值以及环境特性相关。通常,疲劳裂纹的扩展可以采用裂纹尺寸增量与应力循环增量的比值来表示,也就是 Paris 公式^[19]:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot (\Delta K)^m \tag{5}$$

式中: a 为裂纹尺寸; N 为应力循环周期; C 为疲劳系数; m 为材料参数; ΔK 为应力强度因子,可以做如下计算:

$$\Delta K = \Delta \sigma Y(a) \sqrt{\pi a} \tag{6}$$

式中: $\Delta \sigma$ 为应力幅值; $Y(a)$ 为几何修正系数。裂纹尺寸 a 的时变函数可以表示为^[20]

$$\begin{cases} a(t) = \left[a_0^{1-m/2} + (1-m/2) \cdot C \cdot \Delta \sigma^m Y^m \pi^{m/2} N_{avg} t \right]^{2/(2-m)}, & m \neq 2 \\ a(t) = a_0 \exp(C \cdot Y^2 \cdot \Delta \sigma^2 \cdot \pi \cdot N_{avg} t), & m = 2 \end{cases} \tag{7}$$

式中: a_0 为初始裂纹尺寸; N_{avg} 为每年平均应力循环次数; t 为时间。在这里,将几何修正系数视为常数 Y ,可以通过应力强度因子手册查得。当裂

纹扩展到某一临界裂纹尺寸时,结构就会失效,结构的极限状态方程可以表示为

$$g(t) = a_f - a(t) \tag{8}$$

式中, a_f 为疲劳失效的临界裂纹尺寸。由此可以计算结构的失效概率 $P_f = P[g(t) \leq 0]$,相应的失效风险 R_f 定义为失效概率与失效费用的乘积。

基于 Paris 公式的裂纹扩展模型的精度主要取决于初始裂纹尺寸 a_0 、疲劳系数 C 、材料参数 m 以及应力幅值 $\Delta \sigma$ 等参数的精度。图 2 所示为疲劳裂纹扩展概率示意图。图中,PDF(a_0)和 PDF($a(T)$)分别为初始裂纹尺寸 a_0 和设计使用寿命时的裂纹尺寸 $a(T)$ 对应的概率密度函数。

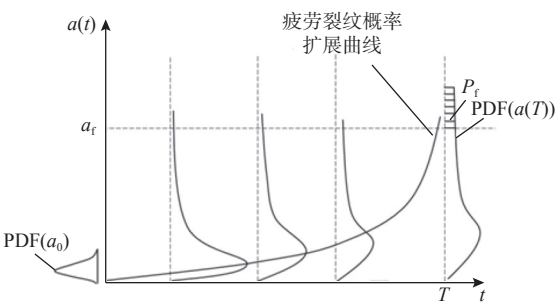


图 2 疲劳裂纹扩展概率示意图

Fig. 2 The schematic diagram of probabilistic crack growth

2.2 维修模型

船舶结构的失效风险会因疲劳累积随时间而变化。为保证船舶在生命周期内的可靠性,船舶结构需进行不同程度的维修或换新。结构工程中常用的裂纹维修方法有打磨、钻一个止动孔、焊接、焊接加后处理以及换新,这些方法用于消除裂纹,减小裂纹尺寸,停止或减缓裂纹的增长,从而改变结构系统的疲劳可靠性。维修的影响主要表现在裂纹尺寸的变化、裂纹扩展速率的变化、疲劳寿命的变化等方面^[21]。图 3 所示为维修后的恢复效果模型,本文主要考虑回到随机状态的维修和回到初始状态的换新,并假设维修能够改变裂纹扩展速率,并使裂纹尺寸能得到一定程度的恢复。

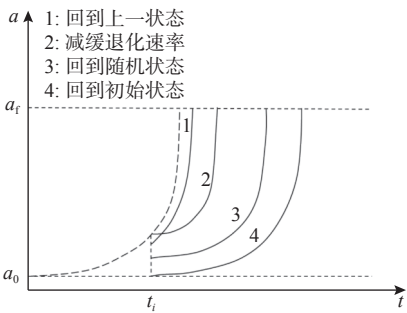


图 3 维修效果模型说明^[21]

Fig. 3 Illustration of repair effect models^[21]

在生命周期 $[0, T]$ 内, 一系列完整的结构运维管理决策过程是一个双序列, 与维修时间和维修干预类型有关, 可以表示为

$$\pi_i = \{(t_1, \xi_{1j}(\zeta_i)), \dots, (t_i, \xi_{ij}(\zeta_i))\} : t_1 < t_2 < \dots < t_i \leq T, \xi_{ij} \geq 0, \xi_{ij} \leq \zeta_i \quad (9)$$

式中: i 为第 i 次维修; j 为维修干预类型; ξ_{ij} 为维修干预恢复程度, 与维修干预类型有关; ζ_i 为换新干预恢复程度。初始状态的失效风险对应 $R_i(0) = r_0$, 在 t_1 时间失效风险会增加到 r_1 , 此时进行第 1 次维修, 结构的失效风险即可以降低 ξ_{1j} , 此时, 失效风险为 $(r_1 - \xi_{1j})$; 若在 t_1 时间进行第 1 次换新, 结构的失效风险可以回到初始状态 r_0 。如图 4 所示, 在 t_i 时间进行维修, 失效风险可以降为 $R_i(t) = R_i(t_i) - \xi_{ij}$ 。图中, r' 指固定维修策略, 用于区分本文的灵活维修策略。如前所述, 本文主要考虑回到随机状态的维修和回到初始状态的换新, 即维修后失效风险的增长速率无法回到最初的状态, 只能回到裂纹开始出现的状态; 换新后无论是失效风险值还是增长速率, 都恢复到初始状态。

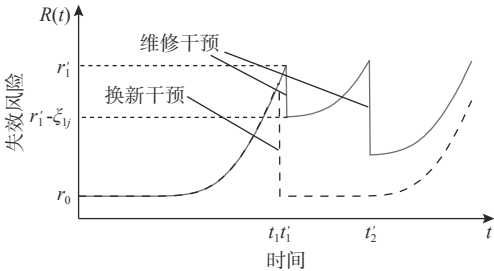


图 4 维修策略示意图
Fig. 4 Maintenance strategy diagram

2.3 全生命周期费用

在考虑维修管理的经济性计算时, 假设船舶的全寿命周期成本包括维修成本和失效成本, 即可以表示为

$$LCC = C_M + C_F \quad (10)$$

式中, C_M , C_F 分别为维修费用和失效费用, 可以表示为^[3]

$$C_M = \sum_{i=1}^n \frac{C_m^{(x_i)}}{(1+r)^{t_i}} \quad (11)$$

$$C_F = \frac{\max[P_f(t)] \cdot C_f}{(1+r)^t} \quad (12)$$

式中: x_i 为维修干预类型或者换新干预; t_i 为维修干预或换新干预时间; 维修费用和失效费用被视作定值 C_m 和 C_f ; $\max[P_f(t)]$ 对应生命周期内最大的失效概率; n 为维修次数; r 为通货膨胀率。

2.4 延寿概率模型

在传统优化决策下, 保守的维修决策也可能

会延长船舶的使用寿命。在这种情况下, 针对固定使用寿命进行最优维修计划决策并不合适, 所以, 合理的维修计划管理需要考虑到延寿长短的概率评估。一般情况下, 考虑延寿时认为寿命延长的概率是随时间呈线性降低的, 延寿的概率质量函数是假设服从三角形分布^[22], 如图 5 所示。

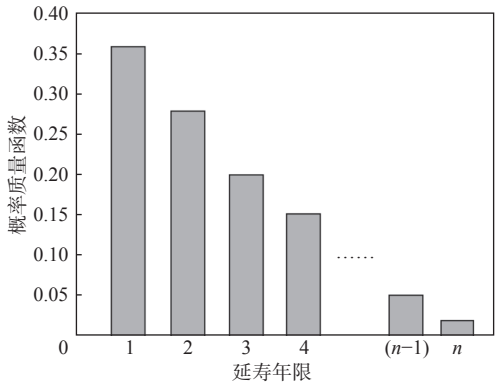


图 5 延寿概率分布图
Fig. 5 Probability distributions of life extension

寿命延长 t_{est} 年的概率使用概率质量函数 $f_T(t_{\text{est}}) = P_T(t = t_{\text{est}})$, 延长的使用寿命期间的失效概率可以表示为

$$P_f^{\text{est}} = \sum_{t_{\text{est}} \in E} f_T(t_{\text{est}}) P_f(t_{\text{est}} + t_{\text{life}}) \quad (13)$$

式中, E 为延寿年限集合。

3 维修策略优化

3.1 固定维修策略

固定维修决策只考虑固定的延寿要求, 通过优化设计使用寿命内的全生命周期费用得到。该优化问题的目标函数是最小化船舶全生命周期费用, 优化问题的决策变量主要是维修时间 t_i 和维修干预方式 x_i , 前者是生命周期内的连续型变量, 后者是离散型变量。优化问题可以表述为:

已知: $r, P_f(t), C_f, C_m, n, \xi_{ij}, f_T(t_{\text{est}})$
决策变量: $x_1, \dots, x_n, t_1, \dots, t_n$
最小化: LCC
约束条件: $t_1 < \dots < t_i < \dots < t_n$
 $t_{i+1} - t_i \geq T_a$
 $P_f(t) \leq P_1$
 $x_i \in \{m_1, m_2, \dots, m_j\}$ (14)

式中: T_a 为裂纹开始出现的时间; P_1 为维修管理时所允许的极限失效概率值; $m_1, m_2, \dots, m_j$ 表示维修干预方式。优化主要运用增强精英保留的遗传算法模板 (soea_SEGA_templet), 以“BG”编码方式, 经过迭代更新来得到目标函数下的最优结果。

3.2 实物期权分析下的灵活维修策略

实物期权分析下的灵活维修决策考虑了不同的延寿要求,降低了延寿不确定性对维修决策的影响。在这里,设定实物期权分析方法下的灵活序列决策为一个多阶问题:在船舶入役后,一旦检测到船体的疲劳裂纹扩展到了危险长度,就对船体板进行换新干预,并将其作为第 1 阶段的维修决策;在第 2 阶段,将根据后期的延寿要求灵活决策,即在船舶服役后期已知延寿要求时,考虑船舶老龄化阶段以及延寿期间的失效风险,优化全生命周期费用得到维修决策。此时,维修时间的优化范围是从船舶的设计寿命后期至延长的寿命,优化问题可以表述为:

已知: $r, P_f(t), C_f, C_m, n, \xi_{ij}, t_1, x_2, t_{est}$

决策变量: $x_2, \dots, x_n, t_2, \dots, t_n$

最小化: $C_M + R_f$

约束条件: $t_2 < \dots < t_i < \dots < t_n$

$t_{i+1} - t_i \geq T_a (i \geq 2)$

$P_f(t) \leq P_i$

$x_i \in \{m_1, m_2, \dots, m_j, R\}$

(15)

式中, R 表示换新。

4 案例分析

以某钢质船的舷侧局部表面裂纹为例,说明实物期权分析方法在维修管理中的应用,具体裂纹位置如图 6 所示。利用式(5)所示局部疲劳裂纹的尺寸进行预测,裂纹扩展参照 Soliman 等^[7, 12]的计算模型,与疲劳裂纹扩展相关的参数值及其随机分布在表 1 中说明。如表 1 所示,假设疲劳系数 C 服从均值为 2.3×10^{-12} 的对数正态分布,变异系数为 0.3;初始裂纹尺寸 a_0 常采用 ABS 规范^[23]推荐的初始裂纹尺寸,并假设其服从对数正态分布,均值和变异系数分别是 0.5 mm 和 0.1;应力幅 $\Delta\sigma$ 被认为服从威布尔分布,均值为 20 MPa,变异系数为 0.1;年均应力循环次数 N_{avg} 服从对数正态分布,均值和变异系数分别为 1.0×10^6 和 0.1;与材料有关的参数 m 假设为确定值 3.0。如前所述,当裂纹长度达到临界失效裂纹长度 a_f 时,结构被视为失效。该研究的临界失效裂纹长度为 50 mm,船舶设计使用寿命为 25 年。

对于船舶这个复杂的系统,维修管理是一个复杂的体系,在这里,假设维修管理主要考虑 4 种维修干预方式和换新干预,不同维修干预方式的量化参数如表 2 所示。维修干预方式 m_1, m_2, m_3 和 m_4 对疲劳裂纹的修复程度分别为 20%, 40%, 70% 和 100%, 并且,其所对应的维修费用比为 2:4:7:10^[16]。

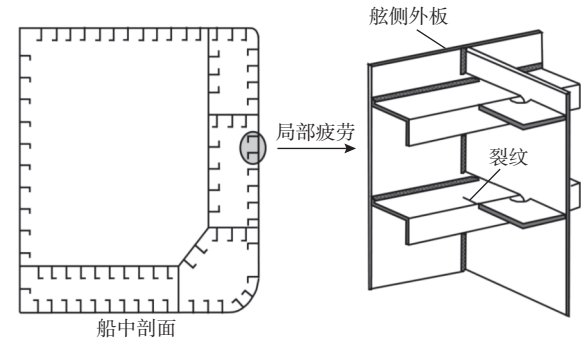


图 6 疲劳裂纹的位置^[24]
Fig. 6 The location of fatigue crack^[24]

表 1 疲劳裂纹扩展的随机变量

Table 1 Random variable of fatigue crack propagation

随机变量	分布	均值	变异系数
初始裂纹尺寸 a_0/mm	Lognormal分布	0.5	0.1
应力幅值 $\Delta\sigma/\text{MPa}$	Weibull分布	20	0.1
年均应力循环次数 N_{avg}	Lognormal分布	1.0×10^6	0.1
疲劳系数 C	Lognormal分布	2.3×10^{-12}	0.3
材料参数 m	确定值	3.0	

假设换新干预 R 的维修费用为 20 万元。另外,针对净现值的计算,对计算模型进行了简化,其中保守地假设失效费用 C_f 为 100 万元,通货膨胀率为 2%。

表 2 维修干预的量化参数

Table 2 Quantitative parameters of maintenance intervention

维修干预方式	维修程度 $\xi_{ij}/\%$	维修费用 $C_m^{(x_i)}/\text{元}$
m_1	20	20 000
m_2	40	40 000
m_3	70	70 000
m_4	100	100 000
R		200 000

在考虑延寿概率评估的固定维修决策计划中,假设船舶被要求延长 5 年的使用寿命,根据评估延寿概率的三角形分布,确定将寿命延长 1~5 年的概率分别为 0.36, 0.27, 0.20, 0.13, 0.04。

在确定了优化问题的框架和参数后,即可通过优化计算得到考虑延寿概率的固定维修决策计划。即在 $t_1 = 12.68$ 年, $t_2 = 20.56$ 年时进行 m_4 维修干预,也即图 7 中的维修计划 π_1 。实物期权分析下的维修决策不局限于固定的设计使用寿命,是相对比较灵活的决策分析,能够适应不同的延寿要求。船舶入役后,一旦检测到船体的疲劳裂纹扩展到危险长度,就需对船体板进行换新干预。假设船体板第 1 次换新的时间为 $t_1 = 14.5$ 年,下一次的决策可以根据未来的延寿要求进行局部优

化。不同延寿要求下的计算结果为: 当船舶需要延寿 1 年时, 在 $t_2 = 23.65$ 年时进行 m_1 维修干预; 当船舶需要延寿 2 年时, 在 $t_2 = 24.15$ 年时进行 m_1 维修干预; 当船舶需要延寿 3 年时, 在 $t_2 = 24.52$ 年时进行 m_1 维修干预; 当船舶需要延寿 4 年时, 在 $t_2 = 25.16$ 年时进行 m_1 维修干预; 当船

舶需要延寿 5 年时, 在 $t_2 = 25.71$ 年时进行 m_1 维修干预; 即图 7 中的维修计划 π_2 。以延寿 5 年为例, 2 种维修决策计划对应的失效概率与维修费用曲线分别如图 8 和图 9 所示。由图可见, 在延寿期间, 灵活维修策略的失效概率明显低于固定维修策略的失效概率, 维修费用则相差不大。

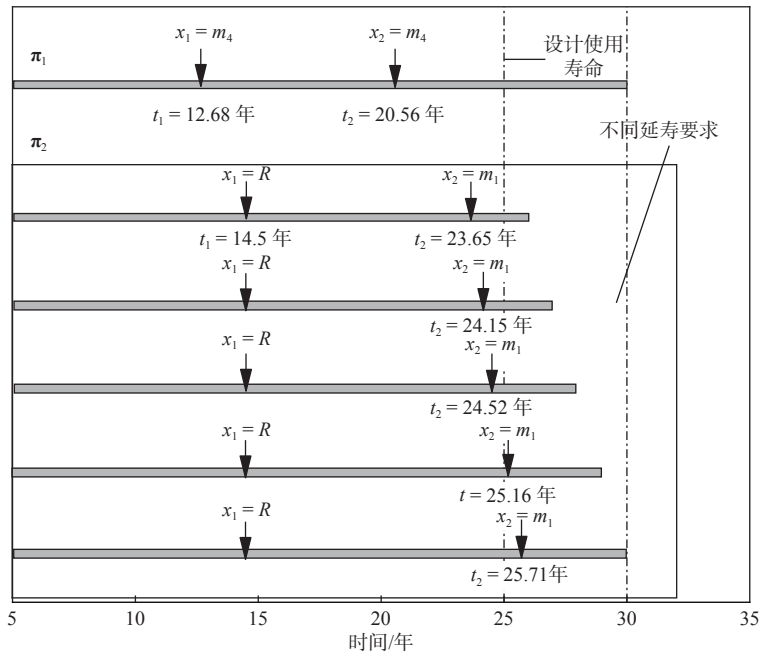


图 7 维修管理计划示意图
Fig. 7 Schematic diagram of maintenance management plan

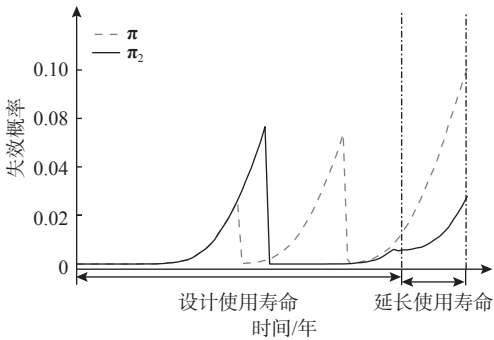


图 8 维修管理计划失效概率变化图 ($t_{\text{est}} = 5$)
Fig. 8 Change graph of failure probability of maintenance management plan ($t_{\text{est}} = 5$)

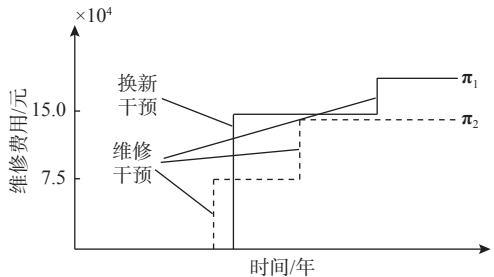


图 9 维修管理计划的维修费用 ($t_{\text{est}} = 5$)
Fig. 9 Maintenance cost of maintenance management plan ($t_{\text{est}} = 5$)

明确实物期权分析下的灵活维修策略 π_2 和固定维修策略 π_1 后, 通过实物期权评估以及相应

的灵活性量化计算进行分析。不同维修策略下的失效风险对照以及灵活维修计划的灵活性价值计算如表 3 所示。在不同的延寿要求下, 灵活的维修策略可以有效提高维修管理的灵活性, 灵活性的相对价值评估为 2.62。在从实物期权的角度分析不同的延寿要求下, 实物期权评估计算如图 10 所示。由图可以看到, 当延寿 1 年时期权价值为

表 3 维修策略经济性分析

Table 3 Economic analysis of maintenance strategy				
维修策略	延寿要求	维修干预		灵活性的 相对价值
		t_1/x_1	t_2/x_2	
π_1	1年			11 963.5
	2年			17 857.1
	3年	12.68/ m_4	20.56/ m_4	24 868.1
	4年			32 638.0
	5年			41 135.9
π_2	1年		23.65/ m_1	3 145.7
	2年		24.15/ m_1	4 608.9
	3年	14.50/ R	24.52/ m_1	6 576.4
	4年		25.16/ m_1	9 076.2
	5年		25.71/ m_1	12 042.2

负,可见实物期权的应用是不值的;当延寿3年、4年和5年时,灵活维修策略的全生命周期费用低于固定维修策略的全生命周期费用,期权价格为0,期权价值总是为正。由此可得,从实物期权价值评估的角度来说,实物期权分析在维修管理中的应用并不一定是值得的。当延寿期限较短时,实物期权的收益低于期权价格,此时,实物期权分析下的灵活维修策略为负收益。因此,实物期权分析在维修管理中的应用适用于延寿期限较长的情景。

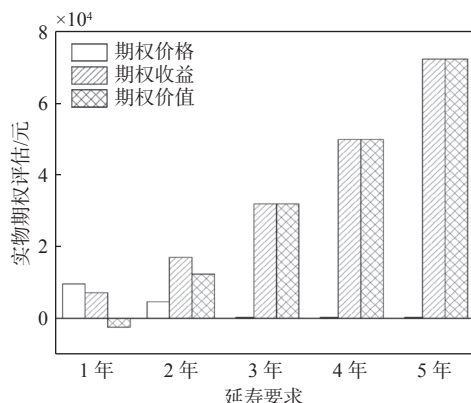


图10 灵活维修策略的期权评估示意图

Fig. 10 Schematic diagram of real option evaluation of flexible maintenance strategy

虽然该算例揭示出实物期权分析在维修管理中很有前景,但也需要认识到获得该研究结果的局限性。疲劳退化模型是以一个具有明确的疲劳裂纹扩展的数值模型来展开计算的,其只假设了简单的应力加载范围和一维的表面裂纹。对于船舶结构问题,疲劳应力应该考虑来自海浪的更复杂的载荷。此外,为了说明维修模型,在维修效果中只考虑了回到随机状态的维修干预和回到初始状态的换新干预,实际上,还可以考虑多种维修效果。延寿要求存在高度的不确定性,没有针对性的理论与规范来应对其对维修管理的影响,计算结果与决策者的意见和偏好相关,存在主观性。

5 结 语

将实物期权分析方法应用到维修管理中,能够灵活地应对船舶未来的延寿不确定性,并提高延寿期间船舶结构的可靠性能。实物期权分析方法提供了一种灵活维修管理策略,可以适应未来的延寿不确定性,并降低延寿期间的失效风险。与传统的设计阈值优化方法相比,实物期权分析方法可以考虑不同的延寿要求,能在船舶设计寿命后期进行局部优化,有效提高维修决策的灵活

性和适应性。实物期权分析下的灵活决策方式打破了传统优化方法的固定决策思维;收益和灵活性量化可以验证实物期权分析在维修管理中的实用性,以这种方式进行分析与评估,可以有效降低延寿不确定性对维修管理的影响。

为了验证实物期权分析方法在维修管理中应用的适应性和灵活性,本文首先通过固定设计阈值优化得到了考虑延寿概率的固定维修策略,然后根据延寿要求调整维修策略,得到了实物期权分析下考虑不同延寿要求的灵活维修策略,对比了延寿期间的经济性和可靠性。从中可以看出,由实物期权分析方法得到的灵活维修策略明显优于固定维修策略。实物期权分析方法在维修管理中最明显的优势体现在2个方面:一是可以降低延寿不确定性的影响,有效提高维修决策的灵活性和适应性;二是能够提高疲劳损伤结构延寿期间的可靠性能。

参考文献:

- [1] 吴梵,滑林. 腐蚀、疲劳损伤下船体结构可靠性研究现状与展望[J]. 中国舰船研究, 2017, 12(5): 52–63.
WU F, HUA L. Current status and prospects of reliability analysis of hull structures under corrosion and fatigue damage[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2017, 12(5): 52–63 (in Chinese).
- [2] 牟子方,魏汝祥. 基于维修规划的舰船船体腐蚀防护经济性分析[J]. 中国舰船研究, 2016, 11(3): 122–127.
MU Z F, WEI R X. Cost effectiveness assessment of ship hull corrosion protection based on the maintenance plan[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2016, 11(3): 122–127 (in Chinese).
- [3] LIU L, YANG D Y, FRANGOPOL D M. Probabilistic cost-benefit analysis for service life extension of ships[J]. Ocean Engineering, 2020, 201: 107094.
- [4] ABS. Review of current practices of fracture repair procedures for ship structures. Report SSC-462.2012[R]. [S.l.]: Ship Structure Committee, 2012.
- [5] 徐辉,高畅. 老龄海洋平台的结构延寿评估[J]. 中国海洋平台, 2018, 33(1): 5–8, 16.
XU H, GAO C. Life extension assessment of structure for aged offshore platform[J]. China Offshore Platform, 2018, 33(1): 5–8, 16 (in Chinese).
- [6] 陈曙梅,迟少艳,黄鑑炜. FPSO 延寿疲劳评估和疲劳寿命改善设计[J]. 船舶工程, 2019, 41(10): 33–39, 45.
CHEN S M, CHI S Y, HUANG L W. Extension fatigue assessment and fatigue life improvement for FPSO[J]. Ship Engineering, 2019, 41(10): 33–39, 45 (in Chinese).
- [7] SOLIMAN M, FRANGOPOL D M, MONDORO A. A probabilistic approach for optimizing inspection, moni-

oring, and maintenance actions against fatigue of critical ship details[J]. *Structural Safety*, 2016, 60: 91–101.

[8] GARBATOV Y, SOARES C G. Cost and reliability based strategies for fatigue maintenance planning of floating structures[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2001, 73(3): 293–301.

[9] YANG D Y, FRANGOPOL D M. Evidence-based framework for real-time life-cycle management of fatigue-critical details of structures[J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2018, 14(5): 509–522.

[10] 程俭达, 刘炎, 李天匀, 等. 强化学习模式下舰船多状态退化系统的维修策略研究 [J]. *中国舰船研究*, 2021, 16(6): 45–51.

CHENG J D, LIU Y, LI T Y, et al. Maintenance strategy of ship multi-state deterioration system under reinforcement learning mode[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2021, 16(6): 45–51 (in Chinese).

[11] MANDELBAUM M, BUZACOTT J. Flexibility and decision making[J]. *European Journal of Operational Research*, 1990, 44(1): 17–27.

[12] KIM S, FRANGOPOL D M, SOLIMAN M. Generalized probabilistic framework for optimum inspection and maintenance planning[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2013, 139(3): 435–447.

[13] BLACK F, SCHOLES M. The pricing of options and corporate liabilities[J]. *Journal of Political Economy*, 1973, 81(3): 637–654.

[14] KNIGHT J T, COLLETTE M D, SINGER D J. Design for flexibility: evaluating the option to extend service life in preliminary structural design[J]. *Ocean Engineering*, 2015, 96: 68–78.

[15] HINO M, HALL J W. Real options analysis of adaptation to changing flood risk: structural and nonstructural measures[J]. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*, 2017, 3(3): 04017005.

[16] GERSONIUS B, ASHLEY R, PATHIRAU A, et al. Climate change uncertainty: building flexibility into water and flood risk infrastructure[J]. *Climatic Change*, 2013, 116(2): 411–423.

[17] ZHANG J, LIU Y, LU Y W, et al. Real-option analysis of optimum maintenance of deteriorating structures [C]//Proceedings of the 7th International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering (IALCCE). Shanghai, China: CRC Press, 2021.

[18] ZULUAGA S, SÁNCHEZ-SILVA M. The value of flexibility and sequential decision-making in maintenance strategies of infrastructure systems[J]. *Structural Safety*, 2020, 84: 101916.

[19] PARIS P, ERDOGAN F. A critical analysis of crack propagation laws[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 1963, 85(4): 528–533.

[20] AKPAN U O, KOKO T S, AYYUB B, et al. Risk assessment of aging ship hull structures in the presence of corrosion and fatigue[J]. *Marine Structures*, 2002, 15(3): 211–231.

[21] ZOU G, GONZÁLEZ A, BANISOLEIMAN K, et al. An integrated probabilistic approach for optimum maintenance of fatigue-critical structural components[J]. *Marine Structures*, 2019, 68: 102649.

[22] LIU Y, FRANGOPOL D M. Optimal maintenance of naval vessels considering service life uncertainty [C]//Proceedings of the 36th IMAC. Model Validation and Uncertainty Quantification. Cham: Springer, 2018.

[23] ABS. Guide for the fatigue assessment of offshore structures[S]. 2003.

[24] SOLIMAN S M, FRANGOPOL D M. Life-cycle management of fatigue-sensitive structures integrating inspection information[J]. *Journal of Infrastructure Systems*, 2014, 20(2): 04014001.

相关论文

[1] 许维军, 华真, 任慧龙, 等. 计及砰击载荷的舰船疲劳损伤直接算法分析 [J]. *中国舰船研究*, 2022, 17(3): 264–272.

[2] 程俭达, 刘炎, 李天匀, 等. 强化学习模式下舰船多状态退化系统的维修策略 [J]. *中国舰船研究*, 2021, 16(6): 45–51.

[3] 华康, 赵文斌, 吴定凡. 海况对大型船舶波激振动疲劳损伤的影响 [J]. *中国舰船研究*, 2021, 16(6): 176–182.

[4] 徐志亭, 赵超, 王福花. 非线性砰击载荷对某大外飘型船舶疲劳损伤的影响 [J]. *中国舰船研究*, 2019, 14(6): 180–185.