

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20220301001

文章编号:1674-599X(2025)01-0112-08

引用格式:郑铭,戴理朝,王磊.基于可靠度和成本优化的斜拉索维修策略分析[J].交通科学与工程,2025,40(1):112-119.

Citation: ZHENG Ming, DAI Lizhao, WANG Lei. Maintenance strategy analysis of stay cables based on reliability and cost optimization [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2025, 40(1): 112-119.

## 基于可靠度和成本优化的斜拉索维修策略分析

郑铭,戴理朝,王磊

(长沙理工大学 土木与环境工程学院,湖南 长沙 410114)

**摘要:**【目的】斜拉索维修养护方案的制定需要从多角度进行权衡,尽可能利用有限的资源,以获得最佳的维修效果,并保障其在服役期内安全运营。【方法】基于斜拉索抗力退化模型对斜拉索服役期内的时变可靠度进行了分析,以目标可靠度为基本约束条件,以斜拉索服役期内累积失效概率和维修经济成本同时最小为目标,基于预防性维修和必要性维修两种方式,建立斜拉索的组合维修策略模型,并应用非支配排序遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II)对该模型进行了求解,通过逼近理想决策从大量的非支配解集中筛选得到最优的维修养护方案。【结果】相比仅采取必要性维修活动,采取适当的预防性维修活动构建组合维修策略明显减小了斜拉索构件可靠性退化的速率,并节省了7.4%的维修费用。【结论】利用建立的斜拉索抗力退化模型可实现斜拉索时变可靠度的计算分析,为斜拉索维修策略的优化提供性能指标依据。通过斜拉索组合维修策略实现了维修效果和经济成本的综合平衡,合理安排预防性维修活动的实施时间可减少必要性维修的次数,在满足性能要求的同时可节省大量维修经济成本。

**关键词:**斜拉索构件;时变可靠度;组合维修策略;多目标优化

中图分类号:U443.38

文献标志码:A

## Maintenance strategy analysis of stay cables based on reliability and cost optimization

ZHENG Ming, DAI Lizhao, WANG Lei

(School of Civil and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** [Purposes] The maintenance plan of the stay cables should be proposed by weighing decisions from various perspectives, in order to make the best use of limited resources to obtain the optimal maintenance effect and ensure a safe in-service operation. [Methods] Based on the resistance degradation model of stay cables, the time-varying reliability during the service period was analyzed. The reliability of the target was taken as the basic constraint. The cumulative failure probability and maintenance economic cost of the stay cable were expected to be minimized during the service period. Based on the preventive maintenance and necessary maintenance, a combined model of maintenance strategies for stay cables was established. The model was solved and analyzed by the non-dominant ranking genetic algorithm (non-dominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II). By approximating the ideal solution decision, the optimal maintenance scheme was obtained from the selection of a large number of non-dominant solutions. [Findings] Compared with the necessary maintenance alone, the combination maintenance strategy formed by appropriate preventive maintenance activities significantly

收稿日期:2022-03-01

基金项目:湖南省交通科技项目(201619)

通信作者:戴理朝(1989—),男,副教授,主要从事桥梁结构安全运维方面的研究工作。E-mail:lizhaod@csust.edu.cn

投稿网址:https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home

reduces the reliability degradation rate of stay cable components, saving 7.4% maintenance cost. [Conclusions] The results show that the time-varying reliability of the stay cable can be calculated and analyzed with the established cable resistance degradation model. This provides a performance index basis for the optimization of the stay cable maintenance strategy. The comprehensive balance between maintenance effect and economic cost is realized through the combined maintenance strategy of the stay cable. The reasonable time arrangement for the implementation of preventive maintenance activities can reduce the times of the necessary maintenance, save a large amount of maintenance costs while meeting the performance requirements.

**Key words:** stay cable component; time-varying reliability; combined maintenance strategy; multi-objective optimization

斜拉索是索塔与主梁的连接构件,也是关键受力构件<sup>[1]</sup>。在服役过程中由于荷载和环境因素的影响,其性能会逐渐退化从而影响结构安全。实施科学的维修策略是保证桥梁安全运营的有效手段。

当前,已经有不少学者对桥梁结构的维修策略展开了探讨。杨伟军等<sup>[2]</sup>以服役期内桥梁的动态可靠性为约束,以维修加固费用和失效损失之和最小为优化目标,探讨了桥梁结构的不同维修加固策略。曾勇等<sup>[3]</sup>提出了基于可靠度和桥梁状况指标的维修优化方法,利用遗传算法对所建立的多目标防腐维修优化模型进行了分析。张建仁等<sup>[4]</sup>基于钢筋混凝土梁腐蚀环境下的时变可靠度模型建立了维修加固模型,并利用粒子群优化算法完成了求解。孙晓燕等<sup>[5]</sup>从维修策略对环境的影响角度出发,将全寿命周期内的碳排放量以成本补偿的方式引入桥梁维修优化中,通过遗传算法对其进行了全局优化。XIE等<sup>[6]</sup>基于遗传算法提出了既有桥梁养护方案的优化框架,对案例桥梁在不同维修方案下的累积失效概率、寿命周期成本和寿命周期环境进行了分析,得到了最优的维修方案。BOCCHINI等<sup>[7]</sup>针对桥梁网络中的预防性维修应用提出了概率计算框架,以维修经济成本最小化和网络性能指标最大化为目标,利用多目标遗传算法实现了求解。

上述研究主要利用不同优化算法对主梁结构的维修策略模型展开了分析,其中遗传算法因其独有的全局搜索特性而被广泛应用,由其优化得到的维修策略具有一定的参考价值。然而有关斜拉索维修策略的研究仍然欠缺,需进一步探索。

因此,本文通过对服役斜拉索可靠度和维修经济成本的分析,基于预防性维修和必要性维修两种方式,建立了以斜拉索维修经济成本和累积失效概率均最小为优化目标的组合维修策略模型,并选用比普通遗传算法运行更快、收敛性更强的非支配排

序多目标优化遗传算法完成了对案例斜拉索的优化求解,得到了最优维修策略。

## 1 斜拉索时变可靠度分析

研究表明<sup>[8]</sup>斜拉索受到自然环境的腐蚀后其有效截面面积衰减是其抗力退化的重要原因。因此,本文利用索体有效截面面积的衰减来描述其抗力的退化规律,并计算斜拉索的时变可靠度。

斜拉索钢丝的腐蚀退化过程可分为4个阶段<sup>[9]</sup>:1) 护套老化开裂;2) 护套破坏后镀锌层开始腐蚀;3) 局部镀锌层耗尽,索体钢丝基质发生均匀腐蚀与坑蚀;4) 当最大蚀坑前缘的应力强度因子达到疲劳裂纹扩展的应力强度因子阈值时,索丝在腐蚀疲劳作用下进入裂纹扩展阶段。上述各阶段斜拉索钢丝截面的损失深度 $a_f(t)$ 可描述为:

$$\begin{cases} a_f(t) = 0 & 0 < t \leq t_1 \\ a_f(t) = D_{1z}(t - t_1)^n & t_1 < t \leq t_2 \\ a_f(t) = D_{1L}(t - t_2)^m & t_2 < t \leq t_3 \\ a_f(t) = a_{ci} + \frac{k(\Delta K - \Delta K_{th})^2(t - t_3)f_z}{2\pi\sigma_{FF}^2} & t_3 < t \end{cases} \quad (1)$$

式中: $t$ 为斜拉索的服役时长; $t_1$ 为外部护套老化的时间点; $t_2$ 为镀锌层失效的时间点; $t_3$ 为钢丝裂纹开始疲劳扩展的时间点; $D_{1z}$ 为镀锌层第一年的锈蚀深度; $D_{1L}$ 为钢丝第一年的锈蚀深度; $n$ 、 $m$ 分别为镀锌材料及索体钢丝的腐蚀参数; $a_{ci}$ 为裂纹开始进入疲劳扩展的临界损失深度; $k$ 为环境常数; $\Delta K$ 为腐蚀疲劳裂纹尖端应力强度因子幅值; $\Delta K_{th}$ 为腐蚀疲劳裂纹尖端应力强度因子阈值; $f_z$ 为斜拉索钢丝的应力循环频率; $\sigma_{FF}$ 为裂纹尖端临界断裂应力。

通过上述公式可计算得到最初腐蚀的斜拉索钢丝截面损失深度,但由于护套破损的位置、几何形状及内部钢丝排列位置等因素的影响,截面上不

同位置钢丝的腐蚀程度存在差异。文献[10]对石门大桥斜拉索钢丝的腐蚀分布规律进行了分析,结果表明不同位置钢丝的腐蚀程度在截面径向和环向上的变化规律相似,且可用正态分布对其进行描述。故此本文利用 $R_n = R_{n-1}a$ 对不同位置钢丝截面损失深度的差异性进行近似量化,如图1所示。其中, $R_n$ 、 $R_{n-1}$ 分别为第 $n$ 、 $n-1$ 层截面上钢丝的腐蚀比率; $a$ 为常数,可近似取上述正态分布的标准值,本文取文献[10]中的平均值,即0.856。

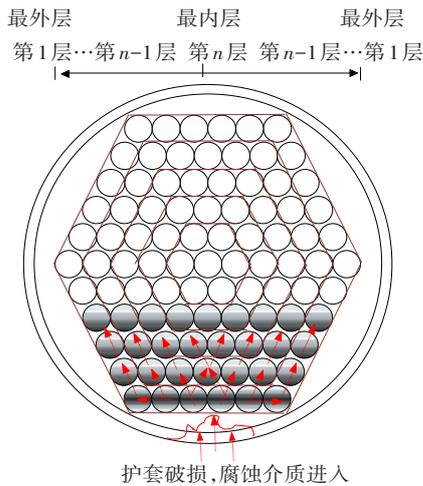


图1 斜拉索钢丝腐蚀进程差异性

Fig. 1 Corrosion process differences of stay cable wires

对斜拉索截面上不同钢丝的腐蚀程度进行量化后,计算单根斜拉索钢丝的有效截面面积。文献[11]认为钢丝损伤前缘几何形态的变化过程为从半圆形到半椭圆形再到直线,如图2所示,图中 $D_e$ 为斜拉索钢丝的直径, $b$ 为椭圆长轴的一半。

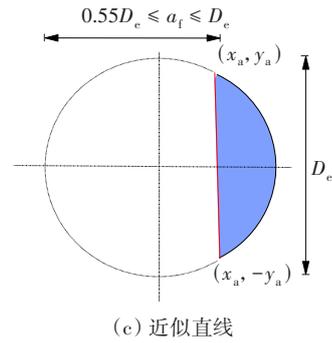
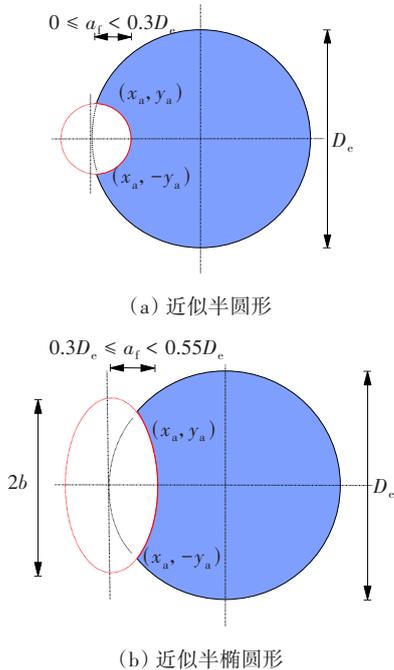


图2 斜拉索钢丝腐蚀损伤截面几何形态

Fig. 2 Cross-sectional geometry of corrosion damaged stay cable wires

1) 当斜拉索钢丝损伤前缘的几何形态为近似半圆形时,即当腐蚀产生的裂纹深度 $a_f \in [0, 0.3D_e]$ 时,钢丝的有效截面面积 $a_{residual}$ 可表示为:

$$\left\{ \begin{aligned} y_a &= \sqrt{a_f^2 - x_a^2}, x_a = \frac{a_f^2}{D_e} \\ a_{residual} &= \frac{\pi D_e^2}{4} - 2 \int_0^{y_a} \sqrt{a_{ci}^2 - y^2} dy - \\ &2 \int_0^{y_a} \frac{D_e - \sqrt{D_e^2 - 4y^2}}{2} dy \end{aligned} \right. \quad (2)$$

2) 当斜拉索钢丝损伤前缘的几何形态近似为半椭圆形时,即当 $a_f \in [0.3D_e, 0.55D_e]$ 时, $a_{residual}$ 可表示为:

$$\left\{ \begin{aligned} x_a &= \frac{-a_f^2 D_e + a \sqrt{a_f^2 D_e + 4b^4 - 4a_f^2 b^2}}{2(b^2 - a_f^2)} \\ y_a &= \sqrt{D_e x_a - x_a^2}; b = a_f \sqrt{1 - \frac{a_f^2}{D_e}} \\ a_{residual} &= \frac{\pi D_e^2}{4} - 2 \int_0^{y_a} \frac{a_f^2}{b} \sqrt{b^2 - y^2} dy - \\ &2 \int_0^{y_a} \frac{D_e - \sqrt{D_e^2 - 4y^2}}{2} dy \quad x_a \leq 0.5D_e \\ a_{residual} &= 2 \int_0^{y_a} \frac{D_e - \sqrt{D_e^2 - 4y^2}}{2} dy - \\ &2 \int_0^{y_a} \frac{a_f^2}{b} \sqrt{b^2 - y^2} dy \quad x_a > 0.5D_e \end{aligned} \right. \quad (3)$$

3) 当斜拉索钢丝损伤前缘的几何形态近似为直线时,即当 $a_f \in [0.55D_e, D_e]$ 时, $a_{residual}$ 可表示为:

$$\left\{ \begin{aligned} a_{residual} &= \frac{1}{720} \left[ \pi D_e^2 \arccos \left( \frac{2a_f - D_e}{D_e} \right) \right] - \\ &\left( a_f - \frac{D_e}{2} \right) \sqrt{a_f D_e - a_f^2} \end{aligned} \right. \quad (4)$$

对于斜拉索,单根钢丝的损伤断裂并不代表整根斜拉索失效<sup>[12]</sup>。因此,斜拉索的损伤退化情况需根据整个截面来判断。将所有钢丝的有效截面面

积相加即可得到整个斜拉索的有效截面面积 $A_{\text{residual}}$ 。

若用斜拉索有效截面面积的变化规律对其抗力退化的随机过程进行表征,则斜拉索在其抗力与作用效应下的功能函数可以表述为:

$$Z(t) = \alpha(t)R_0 - S(t) \quad (5)$$

式中: $\alpha(t)$ 为抗力退化的时变衰减函数; $R_0$ 为结构初始时刻的抗力; $S(t)$ 为斜拉索的作用效应过程。

在推导出斜拉索的功能函数后,本文根据文献[13]中的一次二阶矩法求解斜拉索的时变可靠度。

## 2 斜拉索组合维修策略

### 2.1 斜拉索组合维修策略描述

结构的维修策略通常主要考虑维修时间点及维修程度两个方面。根据维修后结构性能的不同,可将维修活动分为预防性维修活动(preventive maintenance, PM)和必要性维修活动(necessary maintenance, EM)。目前,基于这两种维修活动的组合维修策略已得到充分研究,且服役过程导向型维修策略作为其中之一已得到广泛应用。

本文基于服役过程导向型维修策略模型构建斜拉索的组合维修策略,即在不同的时间点根据斜拉索的服役状态采取不同的维修活动:在斜拉索失

效前,在某个时间点采取预防性维修活动,而后按照一定的时间间隔定期实施预防性维修活动;在某个时间点构件失效后,立即采取必要性维修活动,并规划下一轮预防性维修活动的实施时间。如此循环,直至斜拉索服役期结束,具体如图3所示。

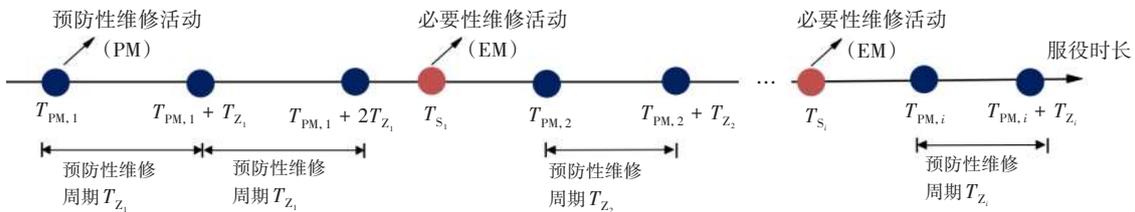
### 2.2 维修安全性能评估

在每次采取维修活动后斜拉索安全性能的变化可用可靠度指标来体现。在斜拉索整个服役阶段,所实施的维修策略为采取若干次维修,则用某个时间点的可靠度指标难以评估整个维修策略的安全性能。因此,本文采用斜拉索服役阶段最终维修后的累积失效概率来评估维修策略的安全性能。

经过一定次数的维修活动后,斜拉索的可靠度用 $\beta(t)$ 表示, $T$ 为斜拉索的服役年限,则整个服役期内斜拉索的累积失效概率 $P_{\text{fc}}$ 可表示为:

$$P_{\text{fc}} = \int_0^T \beta(t) dt \quad (6)$$

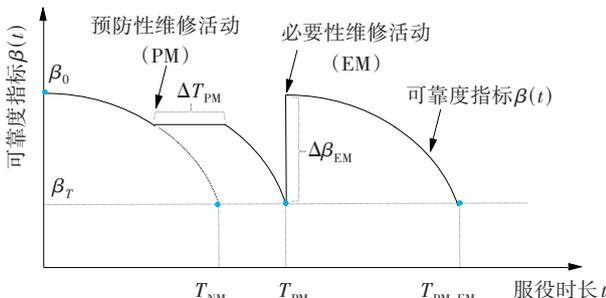
假定每次采取预防性维修活动的措施都相同,且只能减小斜拉索可靠度的退化速率;必要性维修是指更换失效斜拉索构件;当斜拉索可靠度指标降低到目标可靠度临界值时须进行必要性维修,之后斜拉索的可靠度指标恢复到初始水平。采取维修活动后斜拉索的可靠度指标如图4所示。



注: $T_{\text{PM},i}$ 为第*i*轮第一次预防性维修的时间点; $T_{Z_i}$ 为第*i*轮定期预防性维修的时间间隔; $T_{S_i}$ 为第*i*轮构件失效的时间点。

图3 斜拉索服役过程导向型维修策略

Fig. 3 Process-oriented maintenance strategy of in-service stay cables



注: $T_{\text{NM}}$ 为不采取维修活动达到的服役时间; $T_{\text{PM,EM}}$ 为采取预防性维修活动和必要性维修活动组合维修达到的服役时间。

图4 采用不同维修方式时可靠度指标的变化规律

Fig. 4 Rule of reliability index changing with different maintenance methods

### 2.3 维修经济成本分析

不同的维修方式其成本是不同的。根据《公路桥梁养护工程预算定额》(JTG/T 5612—2020)可得到本文斜拉索的直接维修费用,结果见表1。考虑到金钱的时间价值,在计算时引入现金流的折现率 $r_c$ ,将不同时间点的成本转化到相同时间点。本文中折现率 $r_c$ 取4%<sup>[5]</sup>,且假定其保持不变。斜拉索服役期间的维修经济成本 $T_{\text{cost}}$ 可表示为:

$$T_{\text{cost}} = \sum_{i=1}^{n_{\text{PM}}} \frac{C_{\text{PM},k}(t_i)}{(1+r_c)^{t_i}} + \sum_{j=1}^{n_{\text{EM}}} \frac{C_{\text{EM},k}(t_j)}{(1+r_c)^{t_j}} \quad (7)$$

式中: $n_{\text{PM}}$ 、 $n_{\text{EM}}$ 分别为服役过程中斜拉索构件所需采

取的预防性、必要性维修活动的次数; $C_{PM,k}$ 、 $C_{EM,k}$ 分别为第 $k$ 根斜拉索预防性、必要性维修活动的直接成本; $t_i$ 和 $t_j$ 分别为每次预防性、必要性维修活动的开始时间。

表1 不同维修方式的直接维修费用

Table 1 Direct maintenance charges for different maintenance methods

必要性维修活动(更换斜拉索)			预防性维修活动(斜拉索索体修复)	
斜拉索长度/m	项目	基价/(元·t <sup>-1</sup> )	项目	基价
≤150	拆除	3 764.4	一般修复	430元/m
	安装	20 232.3		
≤350	拆除	3 588.9	用聚氟乙烯带缠包	204.5元/m <sup>2</sup>
	安装	20 000.7		

本节基于服役过程导向型策略构建了斜拉索组合维修策略模型,对维修后斜拉索的安全性能和经济成本进行了评估,并利用维修后的累积失效概率和经济成本来评估各个策略的优劣。

### 3 维修策略模型优化求解

本文斜拉索组合维修策略模型所解决的优化问题是在保证结构安全的前提下寻找实施预防性维修和必要性维修的最佳时间点,并使得斜拉索在整个服役期内的维修经济成本及累积失效概率同时最小的多目标优化问题。

多目标优化问题的求解首先需要明确具体参数。对于本文的组合维修策略模型,预防性维修的时间决定了维修策略的选取。因此,优化问题的设计变量可表示为第 $i$ 轮第一次采取预防性维修活动的时间点 $T_{PM,i}$ 和第 $i$ 轮定期预防性维修的时间间隔 $T_{Z_i}$ ,考虑到预防性维修产生的效果有一定的时效性,假设每次预防性维修活动的效果的持续时间为5 a,且后续定期实施预防性维修的时间间隔 $T_{Z_i}$ 不少于2 a。当所实施策略的维修经济成本最小、安全性能最优时,表明所采取的维修策略是最优的,因此模型的优化目标是服役期内斜拉索的累积失效概率 $P_{fc}$ 和维修经济成本 $T_{cost}$ 均最小。在整个服役期内,斜拉索须处于安全运营状态中,即其可靠度指标 $\beta(t)$ 必须高于目标可靠度指标 $\beta_T$ , $\beta_T$ 可根据《公路工程结构可靠性设计统一标准》(JTG 2120—2020)中桥梁结构的目标可靠度确定。

本文组合维修策略优化模型的目标函数、设计

变量及约束条件可定义为:

$$\begin{cases} \text{设计变量 } T_{PM,i}, T_{Z_i} \\ \min P_{fc}, T_{cost} \\ \text{s.t. } \beta(t) > \beta_T, T_{Z_i} \geq 2 \end{cases} \quad (8)$$

在确定优化模型的参数后,分2个步骤利用算法对模型进行求解。第一步,利用非支配排序遗传算法(NSGA-II)进行求解。作为目前应用最广泛的多目标优化算法之一,NSGA-II具备全局搜索特性,可在多个相互矛盾的优化目标中找到最优的Pareto解集。第二步,从该解集中找到维修经济成本最小、安全性能最好的最优解。

因相对加权距离决策方法应用简单,且适用于多个目标的选择决策,故本文利用该方法进行双目标决策。求解斜拉索组合维修策略模型的具体流程如下:

1) 输入相关参数,即目标函数、约束条件及算法参数。目标函数包括维修经济成本及累积失效概率的计算函数,约束条件包括斜拉索时变可靠度指标、目标可靠度指标,算法参数包括迭代次数、初始种群大小、交叉变异选择概率等。

2) 对设计变量(第一次实施预防性维修活动的时间 $T_{PM,i}$ 和时间间隔 $T_{Z_i}$ )进行编码,自动随机生成初代种群,即原始维修策略。

3) 筛选满足可靠度指标约束条件的原始维修策略,计算其目标函数值,即维修经济成本 $T_{cost}$ 及累积失效概率 $P_{fc}$ 。

4) 对原始种群中的个体(不同的维修策略)进行非支配排序,经选择生成初代父种群,再交叉变异生成子代种群,重新计算优化目标函数。

5) 将父代和子代种群合并后重新进行非支配排序,重复操作直至循环结束,得到最优种群和最终的Pareto前沿解集。

6) 对Pareto前沿解集进行解码,对维修经济成本 $T_{cost}$ 和累积失效概率 $P_{fc}$ 这两个目标进行归一化处理。综合考虑这两个目标的权重,设置权重系数,得到归一化解集。

7) 确定归一化解集的最理想解与最不理想解,计算各前沿解的目标函数值与最理想解、最不理想解的相对距离 $D_i^+$ 、 $D_i^-$ 。

8) 根据公式 $C_a = D_a^+ / (D_a^+ + D_a^-)$ 计算各个解的优劣指标参数 $C_a$ ,其值越小说明该解越优。选择优劣指标参数最小的解作为最优决策结果,按照其对应的时间点安排预防性和必要性维修活动,即得到

了最优维修策略。

### 4 案例分析

对文献[14]中某长江大桥的斜拉索应用本文所建立的组合维修策略。由前文内容可知在自质量和车辆荷载的共同作用下第  $n$  根斜拉索的功能函数  $Z_n(t)$  为:

$$Z_n(t) = R_n(t) - S_{G,n} - S_{Q,n} \tag{9}$$

式中:  $R_n(t)$  为第  $n$  根斜拉索的抗力,可用式(5)表述;  $S_{G,n}$  为第  $n$  根斜拉索由自质量产生的抗力;  $S_{Q,n}$  为第  $n$  根斜拉索由车辆荷载产生的抗力,其概率分布和统计参数根据文献[14]确定。

以算例中最长的 A34 号斜拉索为分析对象,按照表 2 给出的具体参数,计算得到 A34 号斜拉索外部护套发生破坏的时间点  $t_1=10.45$  a,镀锌层失效的时间点  $t_2=9.70$  a,斜拉索钢丝开始腐蚀的时间点  $T_1=20.15$  a,具体的计算过程可参考文献[15]。

表 2 A34 号斜拉索基本参数  
Table 2 Basic parameters of A34 stay cable

参数	参数值
长度/m	577
质量/t	59
钢丝数目/根	7
直径/mm	313
弹性模量/MPa	195 000
抗拉强度设计值/MPa	1 770
斜拉索应力均值/MPa	1 556.17
镀锌层第一年的锈蚀深度 $D_{1z}/\mu\text{m}$	0.99
钢丝第一年的锈蚀深度 $D_{1l}/\mu\text{m}$	79
镀锌材料的腐蚀参数 $n$	0.69
索体钢丝的腐蚀参数 $m$	0.50
镀锌材料局部厚度/ $\mu\text{m}$	26.67
环境常数 $k$	1.585
裂纹尖端临界断裂应力 $\sigma_{FF}/\text{MPa}$	58 600
斜拉索钢丝的应力循环频率 $f_f/(\text{次} \cdot \text{min}^{-1})$	1

该算例中斜拉索的设计使用年限为 50 a,利用斜拉索抗力、自重荷载产生的斜拉索应力及随机车辆荷载产生的斜拉索应力推导出功能函数,根据一次二阶矩法<sup>[13]</sup>计算斜拉索的可靠度指标  $\beta$ ,计算结果如图 5 所示。

对上述算例中的斜拉索,利用 NSGA- II 算法对所建立的组合维修策略模型进行优化搜索,得到

Pareto 前沿解集的迭代过程,如图 6 所示。

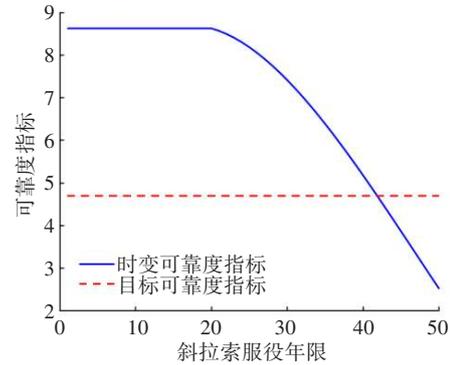
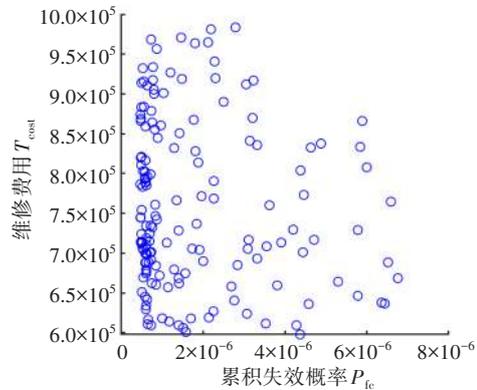
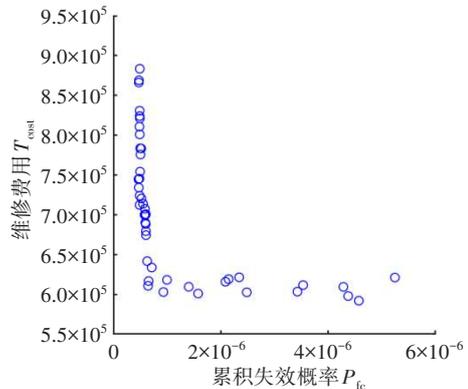


图 5 A34 号斜拉索时变可靠度

Fig. 5 Time-varying reliability of A34 stay cable



(a) 进化初始种群



(b) Pareto 前沿解集

图 6 Pareto 前沿解集的迭代过程

Fig. 6 Iterative process of Pareto front solution set

Pareto 前沿解集代表在服役期内总维修费用与斜拉索累积失效概率达到相对最优的优胜解,图 6 表明维修经济成本与斜拉索累积失效概率成负相关关系。构件累积失效概率降低必然导致维修费用增加,因此需要选择维修费用及累计失效概率均最小的最优解。

图 7 所示为在维修费用与累积失效概率同等重要的情况下 Pareto 前沿解集的归一化和决策过程。

归一化Pareto前沿解集中优劣指标参数最小的解为最优解。最优策略表明共需采取5次维修活动,其中必要性维修活动1次,在第46年实施。预防性维修活动4次,在采取必要性维修活动之前,第一次采取预防性维修活动的时间 $T_{PM,1}=37.6$  a,定期维修的时间间隔 $T_{Z_1}=13.0$  a。在完成一次必要性维修活动之后,需要对预防性维修的时间重新规划,此时的时间安排为 $T_{PM,2}=31.8$  a, $T_{Z_2}=7.4$  a。在整个服役期内,采取组合维修策略的累积失效概率和直接维修费用分别为 $P_{fc}=6.450\times 10^{-7}$ , $T_{cost}=6.106\times 10^5$ 元。

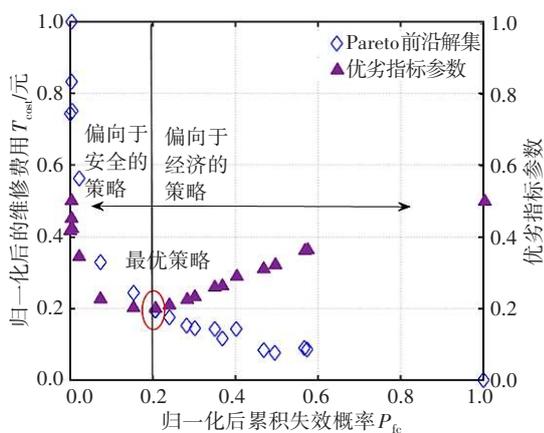
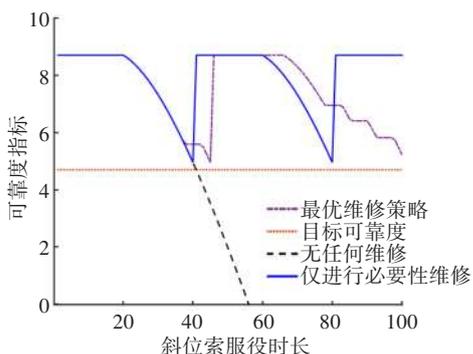


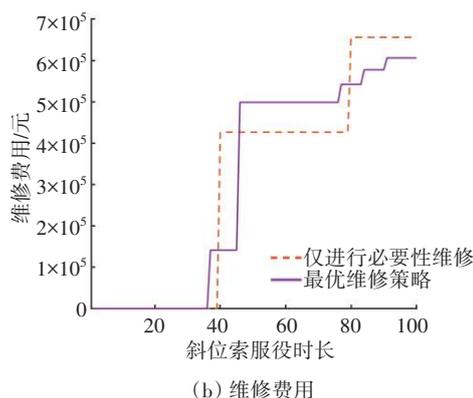
图7 最优解决策过程

Fig. 7 Optimal solution decision-making process

为了更直观地对组合维修策略与传统仅进行必要性维修的策略进行比较,本文分析了这两种策略的可靠度指标和维修费用,如图8所示。由图8可知,当不对斜拉索采取任何维修活动时,斜拉索的时变可靠度在第39年降到了目标可靠度临界值以下,此时斜拉索构件失效。若在整个服役期内仅采取必要性维修活动,则需采取2次,投入的维修费用为 $T_{cost}=6.560\times 10^5$ 元。相比之下,在组合维修策略下,适当的预防性维修活动明显减小了构件的退化速率,节省了7.4%的维修费用。以上对比说明本文所采用的组合维修策略比传统维修策略更能有效



(a) 可靠度指标



(b) 维修费用

图8 不同策略的优化目标值

Fig. 8 Optimization target values of different strategies

地控制成本,其维修效果也更好。

## 5 结论

本文首先对自然环境腐蚀下斜拉索的时变可靠度进行了分析,然后基于桥梁结构的预防性维修及必要性维修方式建立了综合考虑安全性能指标和维修经济成本的斜拉索组合维修策略模型,最后利用多目标优化决策算法对该模型进行了求解。结果表明:

1) 利用本文所建立的腐蚀作用下斜拉索抗力退化模型可以实现斜拉索时变可靠度的计算分析,算例中的斜拉索在服役阶段的可靠度无法在设计使用年限内满足安全标准,需要采取相关维修措施。

2) 斜拉索组合维修策略可实现对预防性、必要性维修活动的合理安排,在保证斜拉索在服役阶段保持较高安全性的同时,相比仅采用必要性维修活动的策略,可节省7.4%的维修经济成本,为斜拉索实施兼顾安全性、经济性的维修方案提供了参考。

本文只对算例中斜拉索组合维修策略的可行性进行了分析,桥梁在实际服役环境中的抗力退化情况可能更加复杂,需进一步对其展开研究。

## 参考文献(References):

[1] 王达, 张明, 鲁乃唯. 实测车流荷载下斜拉索疲劳可靠度研究[J]. 公路与汽运, 2018(4): 110-113, 144. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668. 2018.04.031. WANG Da, ZHANG Ming, LU Naiwei. Study on fatigue reliability of stay cables under measured traffic load [J]. Highways & Automotive Applications, 2018 (4): 110-113, 144. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668. 2018. 04.031.

[2] 杨伟军, 张建仁, 梁兴文. 基于动态可靠度的服役桥梁

- 维修加固策略[J]. 中国公路学报, 2002, 15(3): 49-52. DOI: 10.3321/j.issn: 1001-7372.2002.03.011.
- YANG Weijun, ZHANG Jianren, LIANG Xingwen. Strategy of repair and reinforcement on existing bridges based on time-dependent reliability[J]. China Journal of Highway and Transport, 2002, 15(3): 49-52. DOI: 10.3321/j.issn: 1001-7372.2002.03.011.
- [3] 曾勇, 江伟, 谭红梅. 基于可靠度与状况指标的桥梁维修优化方法[J]. 北京交通大学学报, 2017, 41(3): 69-76. ZENG Yong, JIANG Wei, TAN Hongmei. Optimal maintenance strategy of bridges using reliability and condition index [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2017, 41(3): 69-76.
- [4] 张建仁, 胡守旺, 彭建新. 在役钢筋混凝土桥梁退化机理、可靠性评估及维修策略多目标优化[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2013, 32(6): 1123-1127, 1132. ZHANG Jianren, HU Shouwang, PENG Jianxin. Degradation mechanism, reliability assessment and multi-objective optimization of maintenance strategies of existing reinforced concrete bridge [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2013, 32(6): 1123-1127, 1132.
- [5] 孙晓燕, 董伟伟, 王海龙, 等. 考虑生命周期碳补偿成本的桥梁维修优化决策[J]. 浙江大学学报(工学版), 2012(11): 2013-2019. SUN Xiaoyan, DONG Weiwei, WANG Hailong, et al. Bridge maintenance optimization based on life cycle carbon offset cost analysis [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2012(11): 2013-2019.
- [6] XIE HuiBing, WU Wenjie, WANG Yuanfeng. Life-time reliability based optimization of bridge maintenance strategy considering LCA and LCC [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 176: 36-45. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.12.123.
- [7] BOCCHINI P, FRANGOPOL D M. A probabilistic computational framework for bridge network optimal maintenance scheduling [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2011, 96(2): 332-349. DOI: 10.1016/j.res.2010.09.001.
- [8] 兰成明. 平行钢丝斜拉索全寿命安全评定方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009. LAN Chengming. Study on life-cycle safety assessment method of parallel steel wire stay cables [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
- [9] 刘沐宇, 陈齐风, 吴志强. 考虑微动疲劳的斜拉桥钢绞线斜拉索时变可靠性分析[J]. 土木工程学报, 2012, 45(7): 141-147. DOI: 10.3321/j.issn: 0253-374X.2008.07.009. LIU Muyu, CHEN Qifeng, WU Zhiqiang. Time-dependent reliability analysis of strand cables of cable-stayed bridges considering fretting-fatigue factor [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(7): 141-147. DOI: 10.3321/j.issn: 0253-374X.2008.07.009.
- [10] 徐俊. 拉索损伤演化机理与剩余使用寿命评估[D]. 上海: 同济大学, 2006. XU Jun. Damage evolution mechanism and remaining service life evaluation of cables [D]. Shanghai: Tongji University, 2006.
- [11] 高文博, 袁阳光, 黄平明, 等. 大件运输车载下考虑强度退化过程的钢绞线斜拉索安全评估[J]. 中国公路学报, 2020, 33(8): 169-181. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2019.09.0561. GAO Wenbo, YUAN Yangguang, HUANG Pingming, et al. Safety assessment of steel strand stay cable under customized transport vehicle load considering strength degradation [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(8): 169-181. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2019.09.0561.
- [12] 马亚飞, 欧阳清波, 汪国栋, 等. 基于等效初始裂纹尺寸的吊杆疲劳寿命预测[J]. 交通科学与工程, 2020, 36(2): 52-57. DOI: 10.3969/j.issn.1674-599X.2020.02.009. MA Yafei, OUYANG Qingbo, WANG Guodong, et al. Fatigue life prediction for suspender based on equivalent initial flaw size [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36(2): 52-57. DOI: 10.3969/j.issn.1674-599X.2020.02.009.
- [13] 贡金鑫, 魏巍巍. 工程结构可靠性设计原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007. GONG Jinxin, WEI Weiwei. Reliability design principle of engineering structure [M]. Beijing: China Machine Press, 2007.
- [14] 杨晓艳, 贡金鑫, 张启伟. 随机车辆荷载作用下斜拉索索力的概率模型及可靠度分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2014(2): 90-98. DOI: 10.3969/j.issn.1673-2049.2014.02.016. YANG Xiaoyan, GONG Jinxin, ZHANG Qiwei. Analysis of probabilistic model of stay cable stress and reliability under random vehicle loads [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2014(2): 90-98. DOI: 10.3969/j.issn.1673-2049.2014.02.016.
- [15] 徐宏. 桥梁拉(吊)索损伤后力学分析及安全评价[D]. 西安: 长安大学, 2008. XU Hong. Mechanical analysis and safety evaluation of bridge cable after damage [D]. Xi'an: Chang'an University, 2008.

(责任编辑:石月珍)