

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2026.01.006

引用格式: 刘纲, 孙瑞卿, 李琦, 等. 基于序贯决策的桥梁多阶段维修加固策略优化方法[J]. 重庆大学学报, 2026, 49(1): 60-69.



# 基于序贯决策的桥梁多阶段维修加固策略优化方法

刘 纲<sup>1a,1b</sup>, 孙瑞卿<sup>1a</sup>, 李 琦<sup>2</sup>, 严 琨<sup>2</sup>

(1. 重庆大学 a. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室; b. 土木工程学院, 重庆 400045;

2. 招商局重庆交通科研设计院有限公司, 重庆 400067)

**摘要:** 针对现有维修加固策略优化方法未考虑桥梁结构全生命周期内决策顺序相互影响的问题, 基于序贯决策原理提出一种多阶段双层桥梁维修加固策略优化方法。考虑前序决策行为对后续策略的影响, 采用上层决策确定时序维修加固阶段的性能提升目标, 并将上层决策结果作为约束条件, 通过下层决策确定各阶段各构件采用的具体维修加固方案。算例分析表明, 所提方法较传统策略在保持桥梁全生命周期技术状况更优的情况下, 累积成本花费将降低 28.6%。当桥梁性能状况指标平均劣化速度小于 1.425/年时, 可通过减少维修加固决策阶段划分降低桥梁全生命周期的累积维修加固成本。

**关键词:** 桥梁; 维修加固; 序贯决策; 双层级决策; 动态规划

中图分类号: TU311

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2026)01-060-10

## Optimization of multi-stage bridge maintenance strategies based on sequential decision-making

LIU Gang<sup>1a,1b</sup>, SUN Ruiqing<sup>1a</sup>, LI Qi<sup>2</sup>, YAN Kun<sup>2</sup>

(1a. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education;

1b. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. China Merchants

Chongqing Transportation Research and Design Institute Co., Ltd., Chongqing 400067, P. R. China)

**Abstract:** To address the limitation of existing bridge maintenance optimization methods that fail to consider interactions between sequential decisions across the entire service life, this study proposes a multi-stage, two-level optimization framework grounded in sequential decision-making principles. The upper level model determines performance improvement goals for the maintenance sequence, while considering the influence of preceding decisions on subsequent maintenance policies. The lower-level model then identifies the optimal maintenance actions for each component at each stage, subject to the upper-level constraints. Case analysis shows that, while maintaining superior structural condition over the full life cycle, the proposed method reduces cumulative maintenance cost by 28.6% compared with the traditional strategies. Moreover, when the average deterioration rate of the performance condition index is below 1.425 per year, total life-cycle maintenance and rehabilitation

收稿日期: 2024-05-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFF0501000); 中央高校基本科研业务费资助项目(2023CDJKYJH093)。

Supported by the National Key Research and Development Program of China(2021YFF0501000), and Fundamental Research Funds for the Central Universities(2023CDJKYJH093).

作者简介: 刘纲, 男, 博士, 教授, 主要从事结构健康监测与振动控制研究, (Email)gliu@cqu.edu.cn。



cost can be further reduced by reducing the number of decision-making stages.

**Keywords:** bridge; maintenance; sequential decision-making; two-level decision-making; dynamic programming

截至2023年末,我国共建成各类桥梁120万座,无论数量还是规模均居世界第一。其中,约40%的桥梁已超过平均服役年限,结构老化、功能失效等严重影响桥梁的正常使用和服役安全<sup>[1-2]</sup>。大量实践表明,维修加固是提升桥梁使用性能和寿命的有效途径,但由于资金、人力资源等条件限制,很难对每座存在安全风险的桥梁和所有损伤构件及时进行维修加固<sup>[3]</sup>。因此,在保证结构正常使用前提下,如何通过维修加固顺序、程度的优化决策,以实现桥梁全寿命周期最小经济投入已成为当前的研究热点<sup>[4]</sup>。

传统维修加固决策以专家经验法为主,即通过管理部门或行业专家确定桥梁结构维修加固时机及方法。刘中准<sup>[5]</sup>根据常规检测数据及荷载试验数据建立评价模型,并采用专家咨询法给出决策建议;刘渊<sup>[6]</sup>采用层次分析法和德尔菲专家调查法提出桥梁构件状况等级评定方法,为基于构件的桥梁养护决策提供依据;廖创等<sup>[7]</sup>根据现行的桥梁管养规范建立规则库与专家系统,根据输入桥梁病害描述进行推理,可直接给出桥梁病害养护、维修策略。传统基于专家经验的维修加固决策方法优点在于数据依赖性低、可解释性强、简单且直接,但也存在主观性强、桥梁状态评估准确性存疑及难以制定最优策略等不足。

近年来,业界逐步将优化方法引入维修加固决策。孙广俊等<sup>[8]</sup>考虑桥梁技术状况退化速率和外界荷载环境影响,以桥梁全寿命周期内满足技术状况条件下的养护成本最小化为目标,通过单目标优化求解实现了单座桥梁养护时机的最佳选取;Liu等<sup>[9]</sup>考虑气候及水文条件影响,基于风险率预测对桥梁维护进行决策,降低桥梁风险率的同时减少了运维成本;Han等<sup>[10]</sup>采用非支配遗传算法对钢梁更换位置及时间做进行优化,实现了成本及风险率的最小化;王立彬等<sup>[11]</sup>结合斜拉索寿命函数及运营周期成本理论,实现了延长斜拉索使用寿命的同时累积维修费用最低;边晶梅<sup>[12]</sup>提出了一种基于小生境 Pareto 遗传算法的维修加固决策方法,可实现路网中不同桥梁的桥面板维修加固程度的优化决策;夏烨等<sup>[12]</sup>采用遗传算法实现了路网级桥梁维修加固部位的最优决策;王晓明等<sup>[13]</sup>将非支配遗传算法(nondominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II)与并行遗传算法进行结合,提出基于并行 NSGA-II 的路网级桥梁养护策略优化方法,实现了对原有策略优化方法的改进;戴理朝等<sup>[14]</sup>以桥梁网络整体性能最优、碳排放量和维修总成本最小为目标,提出了桥梁网络的多目标维修策略优化方法,并证明了其方法在优化目标大于等于3个时,收敛性能更好。Mao等<sup>[15]</sup>对路网桥梁有限资源下的维修调度问题进行研究,提出采用上层决策模型实现交通延迟的最小化、采用下层模型实现维修顺序的合理调度。采用优化方法进行决策时,往往通过一定数量维修加固动作的比较,选择当前时刻相对最优的加固策略,但这种优化未考虑桥梁维修加固的时序性质,无法计入当前维修加固策略对桥梁全生命周期性能和加固费用的影响。

文中基于序贯决策理论,将桥梁整个运营期划分为不同的阶段,考虑前序阶段维修加固策略对后续决策的影响,建立桥梁维修加固连续决策模型;采用动态规划算法进行桥梁维修加固策略优化,实现维修加固时机、部位及程度的协同决策,并讨论不同阶段划分对维修决策的影响程度,为桥梁全寿命周期内多次运维决策提供方法支撑。

## 1 序贯决策基本原理

序贯决策是一种决策行为在时间上有先后之别的多阶段决策方法<sup>[16]</sup>,其核心是将复杂决策过程划分为 $N$ 个具有联系的阶段,在第 $k$ 阶段,假设系统处于状态 $S_k$ ,在该阶段所允许决策集 $\{A_{k1}, A_{k2}, \dots, A_{kn}\}$ ( $n$ 为第 $k$ 阶段可行决策变量的总数)中选择执行一个动作 $A_{kj}$ ,称执行决策 $x_k=j$ ,执行该决策后确定第 $k+1$ 阶段的状态量 $S_{k+1}$ ,同时计算执行该决策的效益 $C_k$ ,系统进入第 $k+1$ 阶段。重复以上过程直至达到最终的第 $N$ 个阶段。此时,可以得到一个按时间排列的具有 $N$ 个元素的决策序列 $\mathbf{x}=\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ ,该决策序列被称为策略,因为每做一次决策,都将对系统的优化目标、约束条件产生影响,故策略中的决策行为具有时间效应。序贯决策过程如图1所示,其中粗线表示系统在前3个阶段经过2次决策的状态转移过程。



由于在每个阶段均需做出决策,序贯决策方法在全过程的可行策略很多,序贯决策的目的是采用适当的优化算法从所有可行策略中寻找一个使目标函数取得最优值的最优策略。序贯决策按目标函数及约束条件的不同可分为最小化累计成本或最大化累积收益2种。桥梁结构的运维决策问题以满足性能状况要求为约束,尽可能以降低结构全寿命周期的维修加固费用为目标,进行优化。该过程的数学模型可表示为

$$\begin{aligned} f_k(s_k) &= \min(f_{k+1}(s_{k+1}) + C_k(x_k)), \\ \text{s.t.} \quad &\begin{cases} x_k \geq d_k, k=1, 2, \dots, N, \\ \sum_{k=1}^N x_k \geq \Delta\beta, \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $f_k(x_k)$ 为目标函数,表示系统在第 $k$ 阶段开始时刻至第 $N$ 阶段结束期间的累积成本花费; $s_k$ 为状态变量,表示系统在第 $k$ 阶段开始时刻至第 $N$ 阶段结束时刻的累积性能提升量; $C_k(x_k)$ 表示第 $k$ 阶段执行决策 $x_k$ 时的局部成本; $d_k$ 表示第 $k$ 阶段为使结构性能状况大于限值所需的最小性能提升值,即性能提升目标值; $\Delta\beta$ 表示为使结构全寿命周期的性能状况大于限值所需的最小性能提升值,即性能提升总目标值。

从式(1)可知,第 $k$ 阶段的状态、决策仅与第 $k+1$ 阶段有关,故序贯决策过程具有无后效性。因此,式(1)可采用动态规划算法求解,详细求解方法参考文献[17]。

## 2 桥梁维修的序贯决策方法

桥梁结构设计寿命长,在其运营期间涉及多次维修加固决策。同时,桥梁结构由桥面系、上部结构和下部结构等多个部件组成,每次进行决策时,需对多个维修部件的维修动作进行决策。因此,文中基于序贯决策原理,建立桥梁全生命周期多阶段维修决策模型,并用动态规划算法求解,得到基于时间顺序的桥梁全生命周期维修策略。

### 2.1 桥梁技术状况退化模型

目前,业界主要通过动态可靠度及性能状况指标2种方式表征桥梁技术状况退化,如高凯等<sup>[18]</sup>基于概率密度演化理论提出结构的非线性动态可靠度分析方法;彭建新等<sup>[19]</sup>分别建立了可靠度劣化模型及技术状况劣化模型,并根据建立起的模型对桥梁维修加固方案进行了经济性优化。考虑桥梁技术状况随时间的变化,并量化维修加固对桥梁状态的影响,选取我国《公路桥梁技术状况评定标准》(JTG/T H21—2011)对桥梁的技术状况进行定量评价,并根据文献[18]引入随时间劣化的退化模型:

$$\beta(t) = \begin{cases} \beta_0, & 0 \leq t < t_{cl}; \\ \beta_0 - \zeta \cdot (t - t_{cl})^2, & t_{cl} \leq t. \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\beta(t)$ 表示 $t$ 时刻桥梁技术状况评分; $\beta_0$ 表示桥梁初始技术状况评分; $t_{cl}$ 为结构开始发生劣化的时间; $\zeta$ 为劣化率。退化模型参数均可通过已有的时序监测数据进行拟合;若缺少数据,可按文献[19]中所述的分布规律进行取值。

### 2.2 基于维修程度的成本计算

根据交通运输部文件《公路养护工程管理办法》交公路发[2018]33号规定,将桥梁构件维修加固程度分为不修、小修、中修及大修4个等级,即第 $k$ 阶段各构件从允许决策集{不修,小修,中修,大修}中选择执行。

为量化不同维修加固程度对构件状态及成本花费的影响,定义维修加固度为

$$\alpha = \frac{\beta(t + \Delta t) - \beta(t)}{\beta(t)}, \quad (3)$$

式中: $t + \Delta t$ 为维修加固动作结束时刻。因桥梁技术状况的最大取值为100,故结构允许最大加固程度 $\alpha_{\max}$ 可表示为

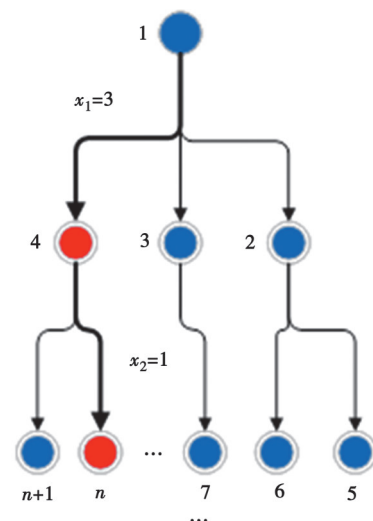


图1 序贯决策过程

Fig. 1 Sequential decision process



$$\alpha_{\max} = \frac{100 - \beta(t)}{\beta(t)}. \quad (4)$$

采用  $\alpha/\alpha_{\max}$  表示相对加固度。参照文献[20]对维修加固度的分类方式,不修、小修、中修和大修加固度分别为 0、0~0.4、0.4~0.8 和 0.8~1,取平均值计算,故不修、小修、中修和大修的相对加固度  $\alpha/\alpha_{\max}$  分别取 0、0.2、0.6 及 0.9。文献[21]的研究表明,维修加固成本计算,在已知结构维修加固造价情况下,可根据额外增加维修加固费用与结构相对加固度提高的比率间的微分关系,建立维修加固费用与维修加固度的映射关系为

$$C(\alpha) = \left[ 1 - \frac{1}{\xi} \ln \left( 1 - \frac{\alpha}{\alpha_{\max}} \right) \right] \cdot C_0, \quad (5)$$

式中:  $C(\alpha)$  为维修加固度为  $\alpha$  时的维修加固费用;  $C_0$  表示除维修行为产生的费用外,维修周期内进行结构健康监测、状态评估、日常例行养护等维养行为产生的费用,文献[21]研究表明,该值约为 0.1 倍结构造价;  $\xi$  为无量纲参数,其值确定了提高结构加固度的难度,  $\xi$  值越小,提高加固度所需花费的资金就越多,根据文献[21],服役桥梁结构  $\xi$  取 0.5。

根据式(5)可知,维修加固费用与结构形式  $\xi$ 、构件造价  $C_0$  及维修加固方法所对应的相对加固度  $\alpha/\alpha_{\max}$  相关。由此计算不同相对加固度的成本花费如表 1 所示。

表 1 不同维修加固度对应成本花费

Table 1 Cost expenditure corresponding to different levels of repair and reinforcement

加固度	$\alpha/\alpha_{\max}$	成本花费
不修	0.0	$C_0$
小修	0.2	$1.446C_0$
中修	0.6	$2.833C_0$
大修	0.9	$5.605C_0$

各维修动作的性能提升值可根据式(3)和式(4)推导:

$$d(t) = \gamma \cdot [\beta(t + \Delta t) - \beta(t)] = \gamma \cdot \frac{\alpha}{\alpha_{\max}} \cdot [100 - \beta(t)], \quad (6)$$

式中:  $d(t)$  表示  $t$  时刻执行某维修动作后构件技术状况的提升量;  $\gamma$  表示对应构件的权重。

### 2.3 桥梁维修的双层级序贯决策模型

在桥梁运维阶段,按一定年限确定维修加固周期,例如,3年、5年或10年。文中将桥梁全寿命周期分为  $N$  个运维阶段,在每个阶段开始时刻进行一次维修加固决策,并假设经过维修后,结构性能劣化趋势保持不变。设需维修加固的桥梁构件共有  $m$  个,用矩阵  $A_{k,4 \times m}$  表示第  $k$  阶段各构件采取的维修加固动作,第  $i$  行第  $j$  列的元素  $a_{ij} \in \{0,1\}$  表示第  $j$  个构件是否采用第  $i$  种维修加固动作,取 1 代表采用,取 0 代表不采用;用矩阵  $C_{4 \times m}$  表示各构件采用不同维修加固动作的成本花费,元素  $c_{ij}$  表示第  $j$  个构件采用第  $i$  种维修加固动作的成本花费;用矩阵  $D_{4 \times m}$  表示各构件采用不同维修加固动作的性能提升值,元素  $d_{ij}$  表示第  $j$  个构件采用第  $i$  种维修加固动作的性能提升值。

任一阶段  $k$  给定一个预期性能提升目标值  $d_k$ ,总存在一种固定的维修加固动作选择策略  $A_k$ ,使得满足性能提升目标的情况下,所需的成本最少。因此,单阶段结构维修的最小成本只与性能提升目标值有关,可表示为  $C_k(d_k)$ 。结构全寿命周期的维修总成本可表示为各阶段成本之和,即  $C = C_1(d_1) + C_2(d_2) + \dots + C_N(d_N)$ ,故全寿命周期维修加固成本也只与每个阶段的性能提升目标有关,可表示为  $C(d_1, d_2, \dots, d_N)$ ,故一定存在一种加固任务分配策略  $\{d_1, d_2, \dots, d_N\}$ ,使得全寿命周期的维修加固总成本最少。

基于以上分析,为在桥梁结构全寿命周期内进一步降低维修加固的成本,构建如下的双层级决策结构。

层级一:单阶段性能提升目标的成本最小化。

对单阶段不同构件采取的维修加固行为进行决策,使结构满足性能提升目标值的情况下,成本花费最



少。数学模型为

$$\begin{aligned} C_k(d_k) &= \min \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^m a_{ij} \cdot c_{ij}, \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^m a_{ij} \cdot d_{ij} \geq d_k. \end{aligned} \quad (7)$$

该模型为非线性规划模型,由于允许决策集较小,可进行遍历求解。

层级二:全寿命周期性能提升目标的成本最小化。

对每阶段的性能提升值目标分配进行决策,使结构全寿命周期内的维修加固成本最少。由于单阶段结构的性能提升值存在上限及下限,即所有构件均不修,记为  $d_{\min}$ ;所有构件均大修,记为  $d_{\max}$ ,可在其之间离散均匀地给定一个  $M$  维的允许决策集  $\{D_1, D_2, \dots, D_M\}$ ,数学模型为

$$\begin{aligned} \min & C(d_1, d_2, \dots, d_N), \\ \text{s.t.} & \begin{cases} \sum_{i=1}^N d_i \geq \Delta\beta, \\ d_i \in \{D_1, D_2, \dots, D_M\}, i=1, 2, \dots, N, \\ d_{\min} \leq D_1 \leq D_2 \leq \dots \leq D_M \leq d_{\max}, \end{cases} \end{aligned} \quad (8)$$

式中:  $\Delta\beta$  表示无维修情况下结构设计使用年限结束时的性能状况值与最低性能状况值要求之差。该模型具有连续、多阶段的特点,考虑前序策略对后续决策的影响。根据式(1),引入  $x_k$  表示第  $k$  阶段开始时刻至第  $N$  阶段结束时刻结构的性能提升值,引入  $f_k(x_k)$  表示结构维修加固总成本花费,建立的序贯决策模型为

$$\begin{aligned} \min & f_1(x_1) \\ \text{s.t.} & \begin{cases} f_k(x_k) = \min (f_{k+1}(x_{k+1}) + C_k(d_k)), \\ x_{N+1} = 0, x_1 = \Delta\beta, \\ x_k = x_{k+1} + d_k. \end{cases} \end{aligned} \quad (9)$$

### 2.3 桥梁维修序贯决策方法流程

文中以全寿命周期内桥梁结构的维修加固成本费用最少为目标,以结构性能状况值大于限值为约束条件,建立优化决策模型,具体策略优化步骤如下:

1) 拟合结构劣化曲线。根据式(2)及结构检测或监测历史数据,拟合符合结构劣化规律的劣化曲线,建立劣化模型。

2) 确定决策因素。确定维修加固动作空间及成本花费矩阵  $C$  及性能提升矩阵  $D$ 。

3) 单阶段成本最小化。离散每一阶段可行的性能提升值,根据式(8),以单阶段成本最小化为目标,性能提升值满足要求为约束条件对各构件的维修动作进行决策。

4) 计算结构全寿命周期性能提升目标值。性能状况最低限值为  $\beta_{\min}$ ,计算无维修情况下结构设计使用年限结束时的性能状况值与最低性能状况值要求之差为

$$\Delta\beta = \beta_{\min} - \beta(T). \quad (10)$$

5) 全寿命周期的累积维修加固成本最小化。根据式(9),采用动态规划算法对每阶段的性能提升值目标分配进行决策,实现全寿命周期累积维修加固成本最小化。

## 3 某简支梁桥维修策略优化算例

### 3.1 桥梁基本情况

某简支梁桥设计使用年限为60年,目前已运行20年,经检测该桥桩基、墩台、主梁及桥面系均有不同程度的损伤,假设,其性能退化函数为

$$\beta(t) = \begin{cases} 90, & t=1, \\ 90 - 0.034 \times (t-1)^2, & t \geq 2. \end{cases}$$



该桥桩基、墩台、主梁及桥面系的造价及造价占比如表 2 所示。

表 2 桥梁构件造价及占比					
Table 2 Proportion of the bridge component costs					
构件	桩基	墩台	主梁	桥面系	总计
造价/万元	617.57	371.33	636.40	357.26	1 982.55
占比/%	31.15	18.73	32.10	18.02	100.00

将该桥剩余使用寿命 40 年划分为 8 个维修加固决策阶段,每个阶段为 5 年。根据式(5)中维修加固费用与维修加固度的映射关系及表 2 中的结构造价占比情况,该桥梁各构件采取不同维修加固动作的成本花费如表 3 所示。

表 3 各构件维修成本花费				
Table 3 Component maintenance cost				
维修方案	桩基	墩台	主梁	桥面系
不修	61.76	37.14	63.64	35.73
小修	89.30	53.70	92.02	51.67
中修	178.05	105.22	180.29	101.22
大修	346.16	208.17	356.70	200.27

一个周期内的维修加固总费用由检测评估费用及采取维修行为本身费用组成。因此,表中采取“不修”的策略时,虽不采取维修行为,但该周期内的结构健康监测、状态评估、日常例行养护等也会产生相应的费用。为使该桥在设计使用年限内正常运行且维修加固的总费用最少,需按时间顺序,为该桥梁结构剩余寿命周期内的桩基、墩台、主梁及桥面系制定合理的维修加固策略。

3.2 计算结果分析

各构件权重  $\gamma_j$  参照行业规范《公路桥梁技术状况评定标准》(JTG/T H21—2011)进行取值。文中不修、小修、中修及大修的加固度  $\alpha/\alpha_{\max}$  分别取为 0、0.2、0.6 和 0.9,故由式(6)计算可得,不同相对加固度对应维修动作下的桥梁性能指标的影响值如表 4 所示。

表 4 桥梁性能指标影响值				
Table 4 Values of bridge performance index				
维修方案	桩基	墩台	主梁	桥面系
不修	0.00	0.00	0.00	0.00
小修	1.44	0.96	2.40	1.20
中修	2.88	1.92	4.80	2.40
大修	4.32	2.88	7.20	3.60

按式(9)建立维修加固序贯决策模型,通过动态规划算法求解,可得基于时间顺序的桥梁维修策略,如图 2 所示。图中从左至右按顺序示出了对应维修加固周期,不同构件应采用的维修加固行为,例如,在第 4 个维修加固周期,桥面系、主梁、墩台及桩基应分别进行中修、中修、小修和小修。

传统维修加固策略设为每当桥梁技术状况值接近最低要求时,进行一次大修,文中策略与传统维修策略下桥梁技术状况如图 3 所示,其中 S1~S8 表示文中维修策略中桥梁全寿命周期的第 1~8 个运维阶段。



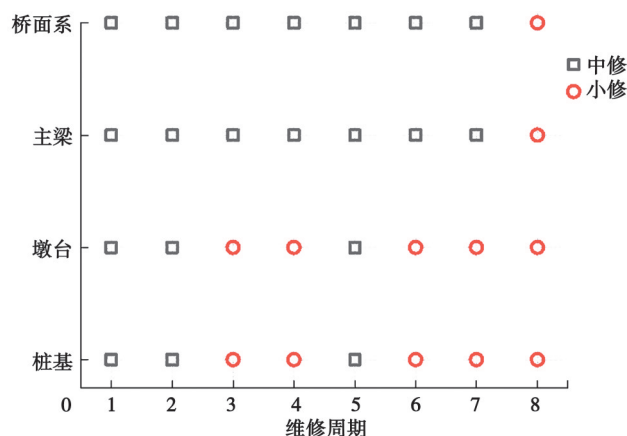


图2 基于时间顺序的桥梁维修策略

Fig. 2 Bridge maintenance strategies based on time sequence

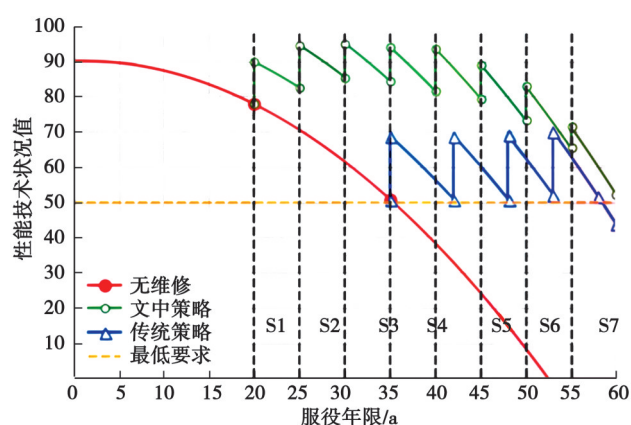


图3 基于序贯决策的策略与传统策略性能提升对比

Fig. 3 Comparison of performance improvement between sequential decision-based strategies and traditional strategies

从图3可知,桥梁全寿命周期内,基于序贯决策的维修加固策略综合考虑了桥梁性能状况与决策时间特性,是一种预防性维修策略,使得桥梁的性能状况优于传统策略。

对于桥梁全寿命周期的维修过程,执行文中策略与传统策略的累计成本花费对比如图4所示。由图可知,传统策略在前5个周期的维修成本较低,但其累积成本花费在第6个周期将超过文中策略的累计成本花费,在全寿命周期内,累计总成本将高出28.6%。

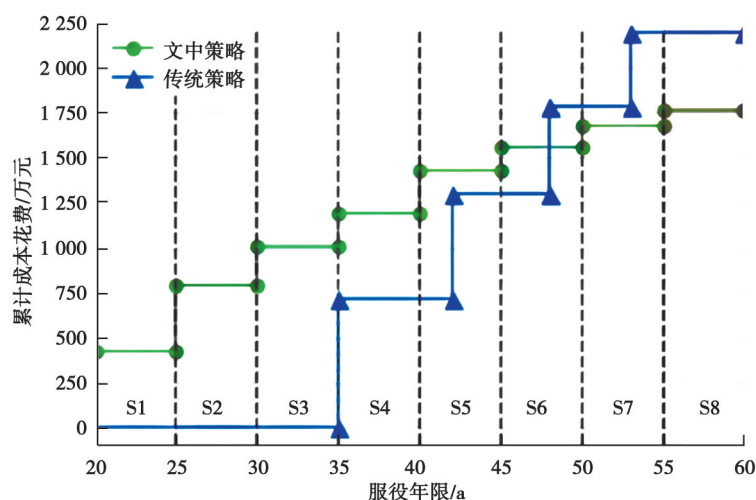


图4 基于序贯决策的策略与传统策略成本对比

Fig. 4 Comparison of cost between policy based on sequential decision and traditional policy



### 3.3 维修频率影响分析

基于时间顺序制定的桥梁维修策略,除维修动作外,维修频率也会对其经济效益产生影响。文中方法是确定维修频率后进行的,但不同的维修频率也会改变优化模型的约束条件,对决策结果产生影响,因此,需要对不同维修频率影响下,桥梁结构的全寿命周期最优维修策略进行分析。在所设条件下,对桥梁结构剩余寿命内进行5~10次维修的情况分别采用序贯决策方法进行策略优化。考虑2个针对维修频率的优化问题:1)以最大化桥梁寿命周期性能提升值为目标,桥梁全寿命周期维修预算值为约束,寻找最优维修频率;2)以全寿命周期维修成本花费最低为目标,性能状况满足运营条件为约束,寻找最优维修频率。计算结果如图5所示。

由图可知,当桥梁结构平均劣化速度大于 $1.425/a$ 时,提高维修频率会降低桥梁全寿命周期的累积维修成本,当桥梁结构平均劣化速度小于 $1.425/a$ 时,提高维修频率反而会增加桥梁全寿命周期的累积维修成本。这是因为劣化速率较快的桥梁,需要通过多次预防性的维修措施,保持结构长期正常运行,避免结构性能状况降低至最低指标之下,甚至失效带来的巨大经济损失。而劣化速率较慢的桥梁则无需过于频繁维修,否则将导致维修过度,造成资源浪费。

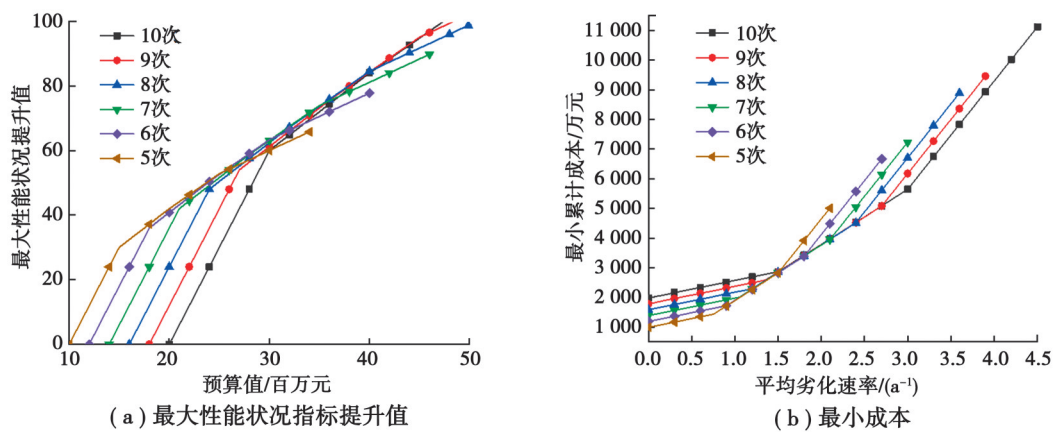


图5 维修频率对桥梁维修策略的影响

Fig. 5 Maximum performance improvement of bridges for different stage divisions

## 4 结 论

基于序贯决策理论,文中提出了一种连续多阶段桥梁维修加固决策方法,在现有维修策略的基础上,考虑了前序维修动作对后序优化目标及约束条件的影响,建立了桥梁维修的双层级序贯决策模型,实现了对桥梁剩余寿命周期内的所有既定维修周期内维修动作的顺序决策,通过算例验证了其可行性,并分析了维修频率对结构全寿命周期维修成本花费的影响,得出如下结论。

1)采用双层级决策结构建立序贯决策模型,实现桥梁结构全寿命周期多阶段维修策略优化。通过上层决策确定各维修阶段的性能提升目标,下层决策确定各阶段桥梁结构各构件的具体维修方案。序贯决策模型将结构全寿命周期的维修决策过程视为动态过程,考虑了维修动作的时序性特点,即前序决策对后序优化目标及约束条件的影响,保证了所得策略为全局最优解。而双层级决策结构减少了允许决策集的大小,提高了决策效率。

2)与传统维修加固策略相比,文中方法在桥梁全寿命周期内的性能状况均较优。虽桥梁运营成本高于传统方法,但从桥梁全寿命周期维修加固累积成本来看,文中方法的累积成本花费降低了28.6%。

3)维修频率对桥梁全寿命周期维修策略的经济效益存在影响。当桥梁结构平均劣化速度大于 $1.425/a$ 时,提高维修频率会降低桥梁全寿命周期的累积维修成本,当桥梁结构平均劣化速度小于 $1.425/a$ 时,提高维修频率反而会增加桥梁全寿命周期的累积维修成本。



## 参考文献

- [1] 中国公路. 40年图说公路[J]. 中国公路, 2018, 24:24-31.  
China Highway. Illustration of highway in 40 years [J]. China Highway, 2018, 24: 24-31. (in Chinese)
- [2] 边晶梅. 服役桥梁维修加固决策研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2009.  
Bian J M. Study on maintenance and strengthening decision for deteriorating bridges[D]. Shenyang: Northeastern University, 2009. (in Chinese)
- [3] 李宏男, 董皓璐, 李超. 基于全寿命周期抗震性能的桥梁结构维修决策方法研究进展[J]. 中国公路学报, 2020, 33(2): 1-14.  
Li H N, Dong H L, Li C. Research progress on life-cycle performance-based seismic maintenance decision method for bridge structures[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(2): 1-14. (in Chinese)
- [4] 张方, 张开权, 邓捷超, 等. 桥梁评估与加固2020年度研究进展[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021(S1): 152-166.  
Zhang F, Zhang K Q, Deng J C, et al. State-of-the-art review of bridge assessment and reinforcement in 2020[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021(S1): 152-166. (in Chinese)
- [5] 刘中准. 桥梁维修加固计算机系统框架研究[J]. 交通标准化, 2010(19): 65-67.  
Liu Z Z. Computer system framework study about bridge repair and reinforcement[J]. Communications Standardization, 2010(19): 65-67. (in Chinese)
- [6] 刘渊. 基于改进技术状况评定的多目标桥梁养护决策方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2022.  
Liu Y. Research on multi-objective bridge preservation decision-making method based on improved technical condition evaluation[D]. Xi'an: Changan University, 2022. (in Chinese)
- [7] 廖创, 李富年, 余兴胜, 等. 桥梁监测系统中智能决策专家系统的设计与实现[J]. 现代电子技术, 2022, 45(1): 110-113.  
Liao C, Li F N, Yu X S, et al. Design and implementation of intelligent decision expert system in bridge monitoring system[J]. Modern Electronics Technique, 2022, 45(1): 110-113. (in Chinese)
- [8] 孙广俊, 焦阳, 吴炳延, 等. 基于技术状况的混凝土公路桥梁周期性预防性养护策略研究[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2022, 44(1): 82-91.  
Sun G J, Jiao Y, Wu B Y, et al. Study on periodic preventive maintenance strategy of concrete highway bridges based on technical status[J]. Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition), 2022, 44(1): 82-91. (in Chinese)
- [9] Liu L, Yang D Y, Frangopol D M. Network-level risk-based framework for optimal bridge adaptation management considering scour and climate change[J]. Journal of Infrastructure Systems, 2020, 26: 04019037.
- [10] Han X, Yang D Y, Frangopol D M. Optimum maintenance of deteriorated steel bridges using corrosion resistant steel based on system reliability and life-cycle cost[J]. Engineering Structures, 2021, 243: 112633.
- [11] 王立彬, 李爱群, 马小利, 等. 基于寿命函数的斜拉索系统维修更换策略研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(6): 162-170.  
Wang L B, Li A Q, Ma X L, et al. Stay-cable maintenance and replacement strategy based on lifetime functions[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(6): 162-170. (in Chinese)
- [12] 夏烨, 王鹏, 孙利民. 基于多源信息的桥梁网级评估方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(11): 1574-1584.  
Xia Y, Wang P, Sun L M. A condition assessment method for bridges at network level based on multi-source information[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2019, 47(11): 1574-1584. (in Chinese)
- [13] 王晓明, 贺耀北, 李瑜, 等. 基于并行NSGA-II算法的桥梁网络养护策略优化[J]. 土木工程学报, 2012, 45(1): 86-91.  
Wang X M, He Y B, Li Y, et al. Optimization of maintenance strategy for bridge networks using parallel NSGA-II algorithm[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(1): 86-91. (in Chinese)
- [14] 戴理朝, 康哲, 陈瑞, 等. 基于NSGA-III的桥梁网络多目标维修决策优化研究[J]. 土木工程学报, 2024, 57(5): 41-52.  
Dai L Z, Kang Z, Chen R, et al. Study on multi-objective maintenance decision optimization for bridge networks based on NSGA-III[J]. China Civil Engineering Journal, 2024, 57(5): 41-52. (in Chinese)
- [15] Mao X H, Jiang X D, Yuanl C W. Modeling the optimal maintenance scheduling strategy for bridge networks optimum maintenance of deteriorated steel bridges using corrosion resistant steel based on system reliability and life-cycle cost [J]. Applied sciences-basel, 2020, 10(2): 1-16.



- [16] Mookerjee V S, Mannino M V. Sequential decision models for expert system optimization[J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 1997, 9(5): 675-687.
- [17] 奚雨新. 分治算法与动态规划算法研究[J]. 长江信息通信, 2021, 34(6): 44-46.  
Xi Y X. Study on divide-and-conquer algorithm and dynamic programming algorithm[J]. Changjiang Information & Communications, 2021, 34(6): 44-46. (in Chinese)
- [18] 高凯, 刘纲, 蒋伟. 考虑荷载相互作用的非线性时变疲劳可靠性分析[J]. 铁道学报, 2022, 44(4): 46-53.  
Gao K, Liu G, Jiang W. Analysis of nonlinear time-varying fatigue reliability considering load interaction[J]. Journal of the China Railway Society, 2022, 44(4): 46-53. (in Chinese)
- [19] 彭建新, 张建仁, 王磊. 劣化桥梁概率维护模型和维护方案成本优化研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2010, 7(6): 35-42.  
Peng J X, Zhang J R, Wang L. Probabilistic maintenance models and maintenance costs optimization for deteriorating bridges [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2010, 7(6): 35-42. (in Chinese)
- [20] 熊辉, 史其信. 混凝土桥梁面板维修的折衷规划优化[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2004, 44(6): 789-792.  
Xiong H, Shi Q X. Optimization of concrete bridge deck maintenance using compromise programming[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2004, 44(6): 789-792. (in Chinese)
- [21] 刘孝. 在役梁桥优化维修决策研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2010.  
Liu X. Research on optimum maintenance decision of concrete girder bridge structure in service[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2010. (in Chinese)

(编辑 陈移峰)