

DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20220517008

文章编号: 1674-599X(2025)01-0120-09

引用格式: 戴理朝, 刘耀凤, 王磊. 基于CO₂排放和经济成本的桥梁维修加固决策优化[J]. 交通科学与工程, 2025, 41(1): 120-128.

Citation: DAI Lizhao, LIU Yaofeng, WANG Lei. Decision optimization of bridge maintenance and reinforcement based on CO₂ emission and economic costs[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2025, 41(1): 120-128.

基于CO₂排放和经济成本的桥梁维修加固决策优化

戴理朝, 刘耀凤, 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】保障桥梁的安全, 有效地协调桥梁加固方法与经济成本、环境影响之间的关系。【方法】将时变可靠度满足目标可靠度作为约束条件, 建立了基于CO₂排放量和经济成本双目标的桥梁维修加固决策优化模型, 运用非支配排序遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II)分析不同维修加固方案对桥梁性能、维修成本及CO₂排放量的影响。【结果】利用桥梁维修加固决策优化模型可得出桥梁的最优维修加固方案, 该方案在设计基准期内保障桥梁安全的同时, 使得CO₂排放量和维修成本相对最低。【结论】提出的双目标桥梁维修加固决策优化模型既给桥梁管理者提供了高效的决策方案, 又在一定程度上为实现“双碳”目标做出了贡献。

关键词: 既有桥梁; 时变可靠度; CO₂排放量; 维修加固决策; 多目标优化

中图分类号: U445.7

文献标志码: A

Decision optimization of bridge maintenance and reinforcement based on CO₂ emission and economic costs

DAI Lizhao, LIU Yaofeng, WANG Lei

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

Abstract: [Purposes] The paper aims to ensure the safety performance of bridges and effectively coordinate the relationships of bridge reinforcement methods with economic costs and environmental impacts. [Methods] By taking the time-dependent reliability meeting the target reliability as a constraint condition, this study established a dual-objective bridge maintenance and reinforcement decision optimization model based on CO₂ emission and economic costs. The non-dominated sorting genetic algorithm II (NSGA-II) was used to analyze the impact of different maintenance and reinforcement schemes on bridge performance, maintenance costs, and CO₂ emission. [Findings] The dual-objective bridge maintenance and reinforcement decision optimization model based on CO₂ emission and economic costs can determine the optimal maintenance and reinforcement scheme for bridges, which ensures bridge safety during the design reference period while minimizing CO₂ emission and maintenance costs relatively. [Conclusions] The proposed dual-objective bridge maintenance and reinforcement decision optimization model provides efficient decision-making solutions for bridge managers and, to a certain extent, contributes to achieving the dual carbon goals.

Key words: existing bridge; time-dependent reliability; CO₂ emission; maintenance and reinforcement decision; multi-objective optimization

收稿日期: 2022-05-17

项目基金: 湖南省交通科技项目(201619)

通信作者: 戴理朝(1989—), 男, 副教授, 主要从事结构长期性能评估与智能维护方面的研究。E-mail: lizhaod@csust.edu.cn

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

随着20世纪基础设施的大量建设,我国的桥梁建设正向管养阶段转型,大量桥梁需要进行定期检修。以往在桥梁运营管理中,管理者们通常将经济成本与性能作为桥梁维修加固的首要优化目标。目前,我国提出“双碳”倡议,使得人们对环境保护的关注度越来越高,桥梁维修过程中对环境产生的影响也逐渐成为研究热点。因此,控制并降低桥梁维护过程中对环境产生的影响,合理地分配桥梁养护资金,使得桥梁达到目标安全状态是桥梁维修加固决策的关键所在。

国内外的学者们已经对桥梁维修加固决策的经济性以及最优性的多目标优化问题进行了研究。王光远^[1]提出了结构服役期间的动态可靠度分析方法,并建立了基于结构动态可靠度的服役结构优化维修决策理论。FRANGOPOL^[2]综合考虑了服役桥梁的时变可靠度与全寿命周期内成本之间的关系,为桥梁维修费用与效益管理的研究奠定了基础。秦权^[3]研究了桥梁在不同维修方案下的维修费用、检测费用及损失成本,以综合费用最小为目标对桥梁生命周期内的维修方案进行了优选。LIU等^[4]对老化桥梁的寿命状态、安全水平以及生命周期内的维修费用进行了分析,并以此作为目标研究了桥梁维修加固决策的优化问题。

上述研究主要针对的是桥梁性能与经济成本的双目标维修加固决策,随着人们环保意识的提高以及国家对碳排放的管控,绿色可持续发展建筑的概念被引入桥梁建设中。孙晓燕等^[5]基于生命周期内的维修加固策略建立了碳排放核算模型,以经济成本与环境影响为目标建立了全寿命周期内的成本模型,并用其对桥梁进行了维修加固策略的优化。DONG^[6]给出了高性能混凝土全寿命周期的CO₂排放量计算模型,并以全寿命成本与环境影响为目标对高性能混凝土结构进行了优化设计。GOKASAR等^[7]通过引入环境评估准则进行了桥梁维修优先级的评定,有效地评估了因桥梁关闭时车辆绕行产生的额外CO₂排放量。然而,学者们的研究大多关注的是桥梁全寿命周期内产生的CO₂排放量,很少对桥梁维修加固期间所产生的CO₂排放量进行分析。

因此,本文以桥梁时变可靠度指标作为约束条件,以设计基准期为时间范畴,以维修加固成本及CO₂排放量为目标,建立桥梁维修加固决策双目标优化模型;基于预定义的维修加固方法,采用多目标优化算法进行求解,分析维修加固方法的可靠

度、维修成本及CO₂排放量间的关系,得出最优维修加固策略,为管理者们提供科学合理的决策意见。

1 基于CO₂排放量和经济成本的维修加固优化计算模型

1.1 桥梁维修加固效应模型

构件时变可靠度 $Z(t)$ 的定义为:在规定期限内,在正常使用及维护条件下,考虑环境及构件抗力衰减等因素的影响,桥梁结构在某一时刻后在后续服役期内完成预定功能的能力^[8]。其计算式为:

$$Z(t) = R(t) - S_c(t) - S_q(t) \quad (1)$$

式中: $R(t)$ 为抗力预测值; $S_c(t)$ 为恒载效应; $S_q(t)$ 为活载效应。

在桥梁服役过程中,混凝土开裂、钢筋锈蚀和意外交通事故等会对桥梁结构的性能造成一定的破坏,桥梁管理者通常会采取措施对桥梁进行加固,以保证桥梁处于安全的基本运行状态中。因此,对桥梁维修加固的时间进行预测,并制定科学合理的加固方案是必要的。维修加固可能会对桥梁产生诸多影响,例如维修后提升了可靠度指标;一段时间内延缓了可靠度指标的退化;一段时间内减小了可靠度指标的劣化率等^[9]。时间与时变可靠度指标的关系如图1所示,图中虚线为无维修行为干预时的可靠度指标下降曲线。由图1可知,当结构使用一段时间后,可靠度指标以劣化率 α 下降, t_f 时刻后低于所规定的安全指标 $\beta_{\text{目标}}$,因此必须对结构进行维修加固;在 t_{pi} 时段后进行维修干预,可靠度指标上升 γ ,在维持时段 t_d 后可靠度指标的退化有所减缓;在维持 t_{pd} 时段后可靠度指标以劣化率 δ 加快下降,直至 $t_{pi} + t_p$ 时刻再次进行维修。

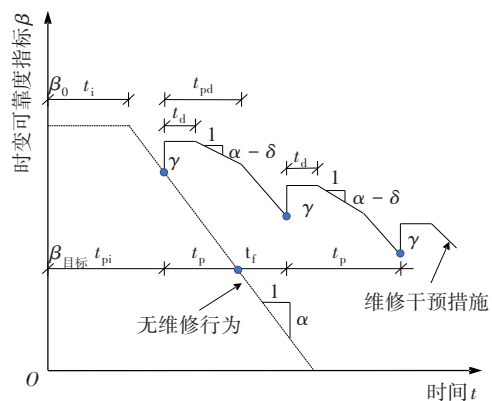


图1 时间与时变可靠度指标的关系

Fig. 1 Relationships between time and time-dependent reliability index

国内外已有许多学者研究了维修加固措施对桥梁可靠度提升的影响。根据文献[10]可知,不同的加固方法对桥梁承载力的影响有所不同,它们通过提升承载力影响桥梁的可靠度。本文参考文献[11],采用粘贴钢板加固法、增大截面加固法、粘贴纤维复合材料加固法及体外预应力加固法对桥梁进行加固,并分析桥梁维修加固的最优决策。

1.2 CO₂排放量计算模型

核算桥梁维修加固期间所产生的 CO_2 排放量是桥梁维修加固决策走向绿色环保及可持续发展的基础。桥梁全寿命周期包括原材料获取与生产预制阶段、材料运输阶段、建造施工阶段、运营维护阶段以及拆除与回收阶段,如图 2 所示。运营维护阶段是桥梁全寿命周期内历时最长也是最复杂的阶段,包括原材料生产制造阶段、材料运输阶段、建造施工阶段^[6],而运营维护阶段又涉及多种维修加固方式。因此,本文以维修加固期间所产生的 CO_2 排放量为主要研究对象,探讨不同维修加固方式对 CO_2 排放量的影响。

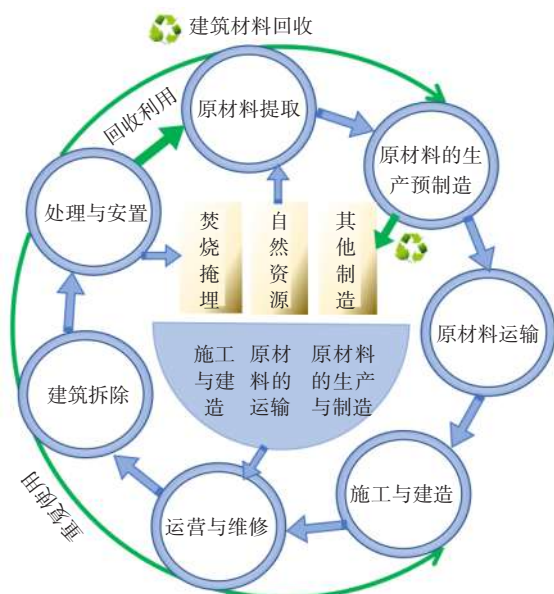


图2 桥梁全寿命周期
Fig. 2 Bridge life cycle

桥梁管理者在进行桥梁维修决策时需比较多
种桥梁维修方式所产生的综合影响以使决策最优。
本文基于不同的维修方式建立维修过程中CO₂排
放量的计算模型。桥梁在设计基准期内的维修加固
阶段所产生的CO₂总排放量 E_{main} 的计算公式为:

$$E_{\text{maint}} = \sum_{l=1}^n (E_{\text{manu},l} + E_{\text{trans},l} + E_{\text{const},l}) \quad (2)$$

式中: n 为维修的总次数; $E_{\text{manu},l}$ 为第 l 次维修时原材

料生产制造阶段产生的 CO_2 排放量; $E_{\text{trans}, l}$ 为第 l 次维修时运输阶段产生的 CO_2 排放量; $E_{\text{const}, l}$ 为第 l 次维修时建造施工阶段产生的 CO_2 排放量。

维修加固过程的第一个阶段是原材料生产制造阶段。在此阶段CO₂排放量的总和为：

$$E_{\text{manu}} = \sum_{i=1}^{n_m} e_i \cdot V_i \quad (3)$$

式中: n_m 为所使用的材料数量; e_i 为材料生产制造阶段单位体积材料(第 i 种)的 CO_2 排放量, kg/m^3 ; V_i 为材料生产制造阶段第 i 种材料的用量, m^3 。

桥梁维修加固过程中常用的建筑原材料包括混凝土、钢绞线、钢筋、骨料等。而混凝土的原材料又包括水泥、水、硅灰以及砂石等。因此,单位体积混凝土的CO₂排放量可表示为:

$$e_{c, \text{manu}} = \sum_{i=1}^{n_{cm}} a_i \cdot f_{c,i} \quad (4)$$

式中: n_{cm} 为混凝土中原材料的数量; a_i 为单位体积混凝土中第 i 种原材料的用量, kg/m^3 ; $f_{\text{c},i}$ 为混凝土中单位质量原材料(第 i 种)的 CO_2 排放量, kg/kg 。

第二个阶段是材料运输阶段,该阶段对环境的影响主要取决于运输的距离与运输方式。不同的运输方式会对环境产生不同的影响。大多数桥梁的原材料是通过道路被运输至目的地的,因此本文不考虑水路与航空运输方式。对于道路运输,其所产生的 CO_2 主要来自汽车的燃油消耗。根据对沃尔沃卡车的数据调查^[12],一辆有效载质量为26 t的卡车在行走1 km后消耗0.275 L燃油,每燃烧1 L燃油释放2.6 kg CO_2 。卡车将材料从出发点运输至目的地后,约有30%的卡车会行驶回出发点。卡车空驶1 km的燃油消耗量约为满载卡车的 $\frac{2}{3}$ ^[13]。考虑运输距离的 CO_2 排放量的计算公式为:

$$E_{\text{trans}} = \sum_{i=1}^{n_m} f_t \cdot d_i \left(f \cdot \frac{G_r}{G_f} + f_j + f_r \right) \frac{G_{a,i}}{G_r} c_t \quad (5)$$

式中: f_i 为车辆燃油率, L/km; d_i 为第 i 种材料的运输距离, km; f 为卡车有效载质量比, kg; f_j 为卡车质量占比; f_r 为从目的地回到出发点的空卡车质量占比; G_r 为卡车实际载质量, kg; G_f 为卡车有效载质量, kg; $G_{a,i}$ 为第 i 种材料的总质量, kg; c_i 为车辆的 CO₂ 排放率, kg/L。

第三个阶段是建造施工阶段。在该阶段CO₂排放量与加固建造方法及加固材料的短距离运输有关,不同的加固建造方法与不同的建造机器有关,进而导致对环境影响大小的不同。在该阶段一般

把材料放在距离桥梁很近的地方储存,待施工时将加固材料用起重机或其他方式运输至施工现场。因此,在该阶段考虑材料吊装架设与运输时对环境产生的影响,CO₂排放量的计算公式为:

$$E_{\text{const}} = G_A \cdot c_g + E_{\text{trans}} \quad (6)$$

式中: G_A 为吊装总质量,kg; c_g 为起重机的CO₂排放率; E_{trans} 计算见式(5),运输距离一般在5 km以内。

1.3 桥梁的维修加固成本

既有桥梁在其服役期内随着服役时间的增加,性能不断退化,相应的可靠度指标不断降低,当其安全性不足以支撑其正常运行时,需对桥梁进行维修加固。不同的加固措施会产生不同的费用,维修加固成本与可靠度之间的动态关系如图3所示。在满足桥梁可以安全使用的前提下,应尽量减少养护资金的投入。桥梁养护周期内费用分析的目的是寻求养护资金的最佳分配方案,让有限的养护资金发挥最大的经济效益,使桥梁总是保持良好的运营状态,以保证路网的通行效率。在分析桥梁养护周期内的费用时,考虑货币的时间成本,应将桥梁各个时期发生的费用用现值表示,所以引入贴现成本的概念计算维修成本。则服役期内维修加固直接成本的计算公式为:

$$C_{\text{ss}} = \sum_{t=0}^T \sum_{j=1}^m \frac{C_{ij}}{(1+r)^t} \quad (7)$$

式中: T 为桥梁设计基准期,为100 a; m 为桥梁的构件数; C_{ij} 为桥梁第 j 个构件在第 t 年的维修加固成本; r 为货币折现率,一般取2%~4%。

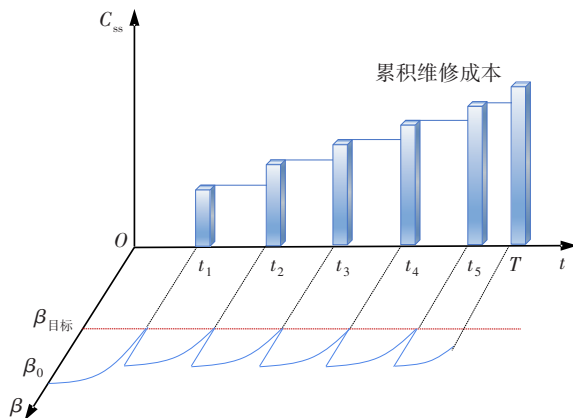


图3 桥梁维修加固成本与时变可靠度的关系

Fig. 3 Relationship between of bridge maintenance and reinforcement costs and time-dependent reliability

2 桥梁维修加固决策双目标优化框架

2.1 维修加固目标优化模型

基于上述CO₂排放量和经济成本的计算模型,建立以CO₂排放量和经济成本最低为目标的桥梁维修加固决策模型。在该模型中每次维修的时间节点是桥梁时变可靠度低于目标可靠度的年限,维修间隔则与当年采用的维修方案相关。因此,以维修加固方案作为设计变量,以可靠度满足目标可靠度为约束条件,建立优化方程:

$$\begin{cases} \min & C_{\text{ss}} = \sum_{t=t_p}^T C_{ij} \text{ 和 } E_{\text{maint}} = \sum_{t=t_p}^T E_{ij} \\ \text{s.t.} & \beta(t) \geq \beta_{\text{目标}} \end{cases} \quad (8)$$

式中: C_{ss} 为桥梁服役期内桥梁的维修成本; C_{ij} 为第 t 年对桥梁实施第 j 种维修方式产生的费用; E_{ij} 为实施第 j 种维修方式产生的CO₂排放量; T 为桥梁设计基准期; t_p 为既有桥梁研究的开始年限; $\beta(t)$ 为桥梁的时变可靠度指标; $\beta_{\text{目标}}$ 为承载能力极限状态下的目标可靠度指标,此处取为3.7。

2.2 基于NSGA-II的优化流程

非支配排序遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II)本质上是多目标优化问题的求解算法,其复杂程度较低^[14];具备精英保留机制,该机制能确保非支配解保存到下一代,以达到最后一代全部为精英子代的目的;能快速对种群的优劣性进行排序,采用拥挤距离比较算子代替复杂的共享参数的适值共享。

本文使用NSGA-II对桥梁维修加固策略进行优化。在种群进化过程中可产生大量的维修加固方案,及与之对应的维修加固成本与CO₂排放量。2.1节的优化模型的优化流程如下:

- 1) 输入维修加固优化决策的相关项,包括基于JC法的时变可靠度计算模型、目标可靠度约束值、目标函数;
- 2) 确定优化算法的进化代数、种群大小、交叉概率、变异概率以及选择概率等参数;
- 3) 对维修加固方案进行染色体编码,生成初代随机种群,确定初始的桥梁维修加固方案;
- 4) 在时变可靠度满足目标可靠度的条件下,通过初始维修加固方案的目标函数计算得到维修加固成本及CO₂排放量;

- 5) 对种群中的个体,即维修加固方案进行快速非支配排序;
- 6) 通过选择操作从种群中选择第一代父代;
- 7) 经过交叉、变异之后生成子代种群;
- 8) 再次计算目标函数值,得到维修加固成本及CO₂排放量;

- 9) 将父代和子代种群进行合并;
 - 10) 对合并种群中的个体进行快速非支配排序;
 - 11) 产生更优秀的种群,得到 Pareto 前沿解集,更新桥梁维修加固方案。
- 计算流程如图 4 所示。

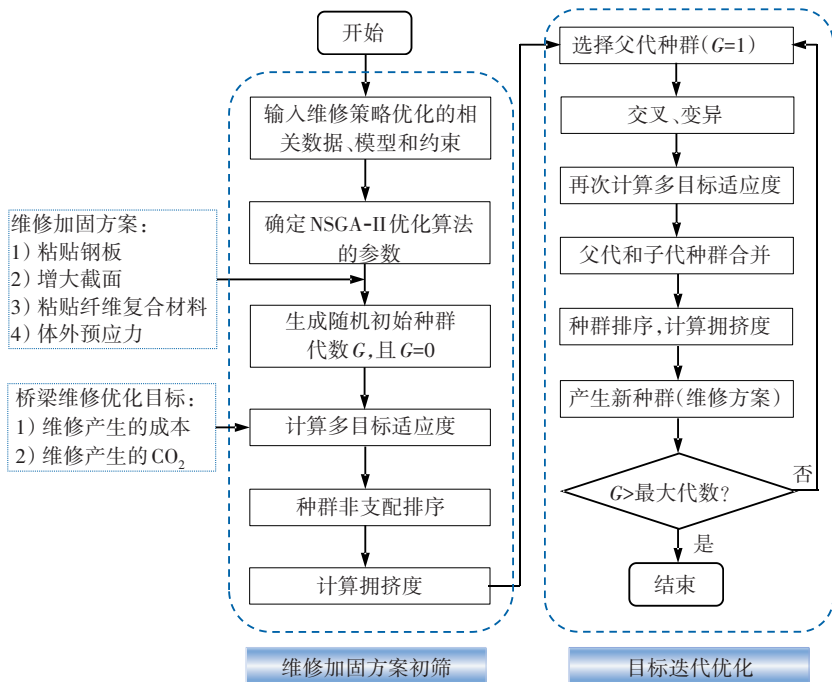


图 4 目标函数优化流程

Fig. 4 Objective function optimization process

3 实桥分析

本文以一座服役期为 15 a 的 4×20 m 钢筋混凝土简支 T 梁为例,其上部结构由 5 片 T 梁组成,桥梁的跨径为 19.4 m,设计基准期为 100 a,实际已经运营使用了 15 a,设计汽车荷载等级为公路-Ⅱ级,结构安全等级为三级,混凝土强度等级为 C25^[15-16]。本文对该简支 T 梁进行维修加固决策优化分析,用维修加固后的承载能力来反映维修效果。

考虑到混凝土强度退化、钢筋锈蚀、混凝土与钢筋之间的黏结退化以及材料特性的不确定性,本文通过 JC 法计算桥梁时变可靠度指标。抗力随机变量统计参数、恒载内力及最不利弯矩见表 1~2。通过计算可得,1#(5#)梁、2#(4#)梁、3#梁的可靠度低于目标可靠度的时间分别为第 38、43、47 年,而全桥可靠度低于目标可靠度的时间为第 35 年,如图 5 所示。以全桥可靠度满足目标可靠度为约束条件,对各梁进行维修加固。

表 1 抗力随机变量统计参数

Table 1 Statistical parameters of resistance random variables

随机变量	说明	设计值	统计参数		
			μ	σ	δ
混凝土强度 f_c /MPa	C25	11.5	1.586 8	0.305 9	0.192 8
钢筋锈蚀速率 i_{corr} /mm·a ⁻¹	均匀		2.000 0	0.300 0	0.150 0
钢筋强度 f_s /MPa	Ⅱ级	280.0	1.084 9	0.078 0	0.071 9
计算模式的不 确定性参数 K_p	受弯		1.000 0	0.040 0	0.040 0

表 2 各片梁恒载内力值(G_k)及跨中最不利弯矩

Table 2 Internal force (G_k) of each beam under dead load and the most unfavorable bending moment in midspan

梁号	G_k /kN	弯矩/ (kN·m)	梁号	G_k /kN	弯矩/ (kN·m)
1#	863.16	1 083.29	4#	897.24	942.78
2#	897.24	942.78	5#	863.16	1 083.29
3#	897.24	834.86			

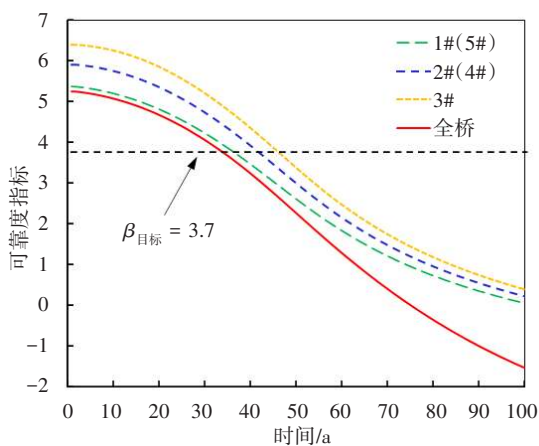


图5 各片梁及全桥可靠度

Fig. 5 Reliability of each beam and the bridge

根据参考文献[11],本文采用粘贴钢板加固法、增大截面加固法、粘贴纤维复合材料加固法和体外预应力加固法对桥梁进行加固,分析多种维修加固方式下考虑维修成本和 CO₂排放量的桥梁双目标维修加固决策的优化问题。维修单价与材料用量见表3。

在维修加固过程中产生的 CO₂排放量由维修方案、维修材料用量、工程规模以及单位原材料的 CO₂排放量决定。上述4种维修加固方法下单位原材料的 CO₂排放量见表4^[6]。

本文基于 NSGA-Ⅱ 优化算法对考虑 CO₂排放量和经济成本双目标的桥梁维修加固决策模型进行优化。首先,将维修加固方法编码为染色体,每个染色体代表不同的维修加固方法;然后,通过 NSGA-Ⅱ 多目标优化算法对这些染色体进行选择、交叉和变异,产生新的种群,并经过遗传迭代得到 Pareto 前沿解;最后,从前沿解中寻求相对最优解。

图6所示为经过种群迭代后上述4种维修加固方法的双目标优化支配解和 Pareto 前沿解,Best 表示前沿解中的相对最优解。在单一维修加固方法的 Pareto 前沿解中,维修加固成本与 CO₂排放量近似成正相关关系,但并非成线性正相关关系,因此迭代至最后一代时有多个 Pareto 前沿解,需根据 Pareto 前沿解与坐标原点之间的距离选择最优解。这意味着在桥梁维修加固过程中,实现了成本和 CO₂排放量相对最小的目标。

在最优解之下,上述4种维修加固方法对桥梁可靠度的影响如图7所示,图中虚线为目标可靠度 3.7。由图7可知,每种维修加固方法都满足了桥梁设计基准期内的安全使用要求。由于在第46年之

表3 维修加固方法的材料用量及相应费用

Table 3 Material consumption in maintenance and reinforcement methods and corresponding costs

方法	材料种类	材料用量	单价/ (元·m ⁻²)
不维修	无	0	0
粘贴钢板加固	钢板	厚度: <i>t</i> =6 mm 长度: <i>L</i> =4 142 mm	808
		厚度: <i>t</i> =8 mm 长度: <i>L</i> =5 324 mm	1 244
		厚度: <i>t</i> =10 mm 长度: <i>L</i> =6 506 mm	1 680
		厚度: <i>t</i> =12 mm 长度: <i>L</i> =7 688 mm	2 116
增大截面加固	钢筋	根数: <i>n</i> =2	574
	混凝土	增高: <i>h</i> =200 mm	
	钢筋	根数: <i>n</i> =4	846
	混凝土	增高: <i>h</i> =200 mm	
	钢筋	根数: <i>n</i> =6	1 118
	混凝土	增高: <i>h</i> =200 mm	
粘贴纤维复合材料	钢筋	根数: <i>n</i> =8	1 390
	混凝土	增高: <i>h</i> =200 mm	
	碳纤维布	层数: <i>n</i> =4	1 280
		层数: <i>n</i> =6	1 920
体外预应力加固	1×7∅15.2 mm 钢绞线	束数: <i>n</i> =2	1 000
		束数: <i>n</i> =4	1 500

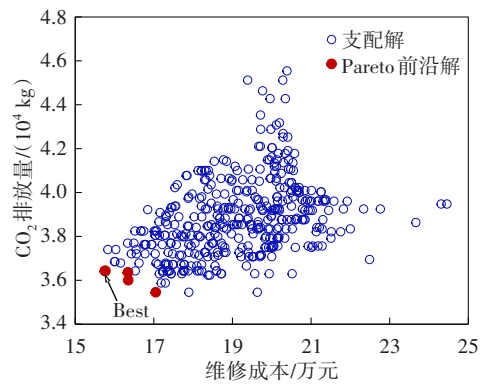
表4 单位原材料的 CO₂排放量

Table 4 CO₂ emission per unit of raw materials kg/kg

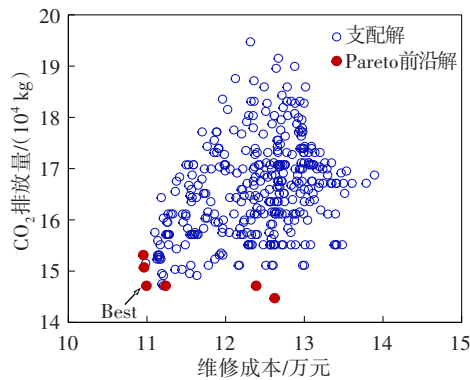
材料	CO ₂ 排放量	材料	CO ₂ 排放量
钢板	1.850 0	水泥	0.865 0
砂石	0.001 3	减水剂	0.018 4
普通钢筋	3.030 0	碳纤维布	11.000 0
预应力筋	5.610 0	水	—

前只对其中两片梁或三片梁采取了维修措施,故可靠度提升得较慢;后期根据需要对全桥进行加固,或者在其他梁可靠度较高的情况下对可靠度较低的梁进行加固会使可靠度提升较快。

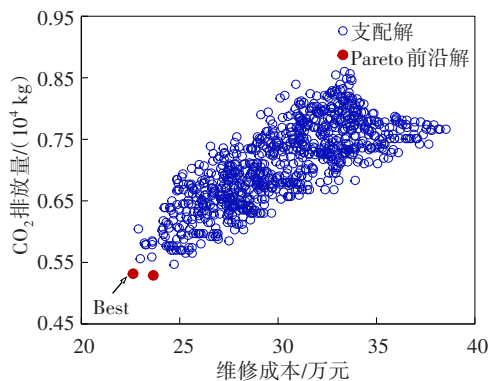
图8为在满足安全的条件下,采用单一方法维修加固后维修成本及 CO₂排放量的最优解。由图8



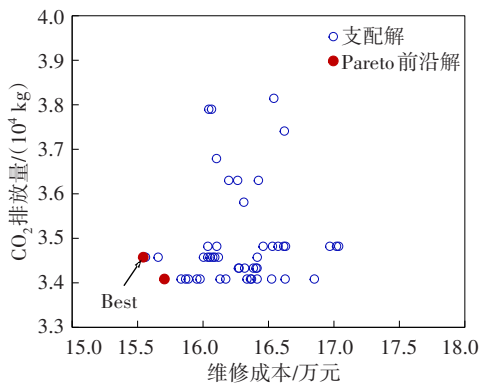
(a) 粘贴钢板加固



(b) 增大截面加固



(c) 粘贴纤维复合材料加固



(d) 体外预应力加固

图6 双目标优化支配解及 Pareto 前沿解

Fig. 6 Dominant solution and Pareto frontier solution of dual-objective optimization

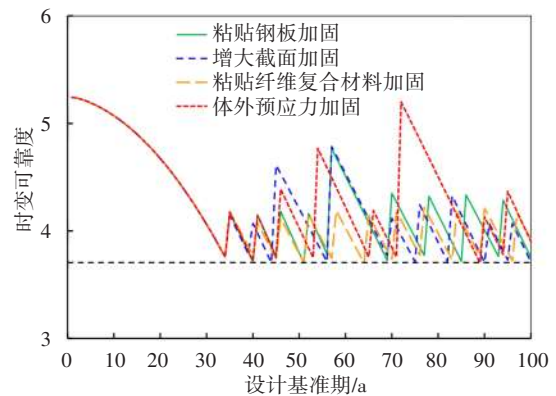
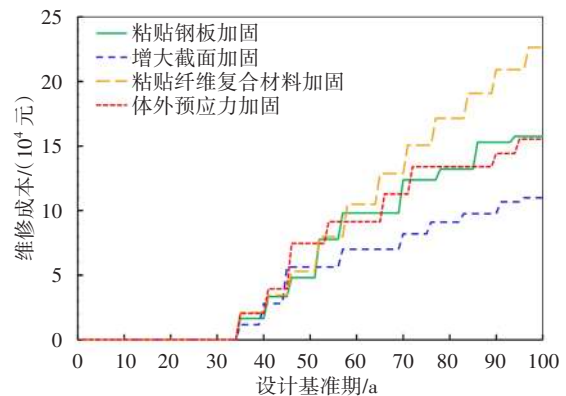
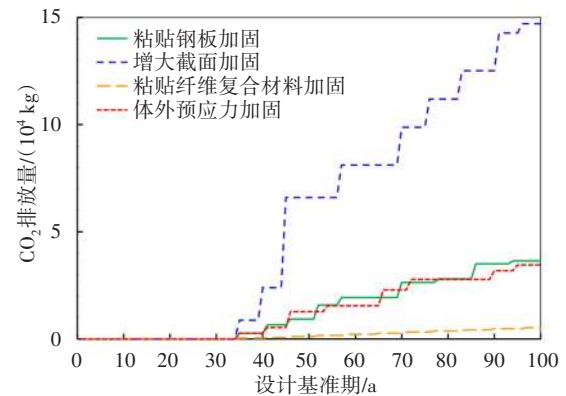


图7 采用单一维修加固方法的桥梁可靠度

Fig. 7 Reliability of single maintenance and reinforcement methods for a bridge



(a) 维修成本

(b) CO₂排放量图8 单一方法维修加固后的维修成本和CO₂排放量Fig. 8 Maintenance costs and CO₂ emission after the use of single maintenance and reinforcement methods

可知,增大截面加固方法下原材料制造所产生的CO₂排放量比其他加固方法的多,在维修次数相差不大的情况下,增大截面加固方法所产生的CO₂总排放量最大;而粘贴纤维复合材料方法的费用最高,CO₂排放量最少。由上述分析可知,每种维修加固方法对成本和CO₂排放量的影响都不尽相同,为

此本文探讨了这4种维修加固方法组合后的最优情况。

在组合维修活动中,基于CO₂排放量 and 经济成本的桥梁维修加固决策优化模型的支配解和 Pareto 前沿解如图9所示。与单一维修加固决策的前沿解的变化趋势不同的是,图9中前沿解的变化趋势更倾向于一条负相关曲线,维修费用与CO₂排放量并不像单一维修加固方法中那样近似成正相关关系,而是成负相关关系。最优解为 Best 点, B1 为维修费用最小的点, B2 为 CO₂ 排放量最小的点。若维修成本充足,且考虑可持续发展,应减少 CO₂ 排放量,此时 B1 显然是最优的。基于这三个解的决策对可靠度的影响如图10所示。由图10可知,它们均满足桥梁在设计基准期内的安全使用要求。

单一维护活动下的相对最优解与组合维护活动下的最优解如图11所示。

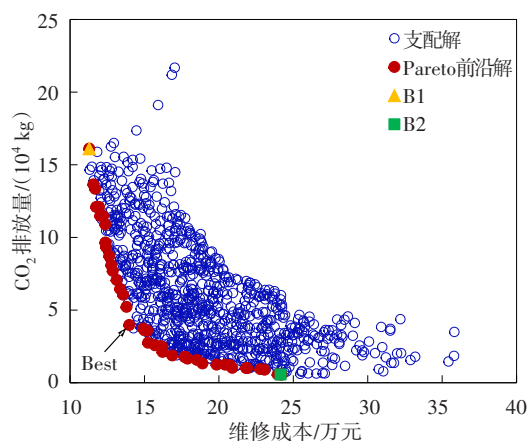


图9 双目标优化支配解和 Pareto 前沿解

Fig. 9 Dominant solution and Pareto frontier solution of dual-objective optimization

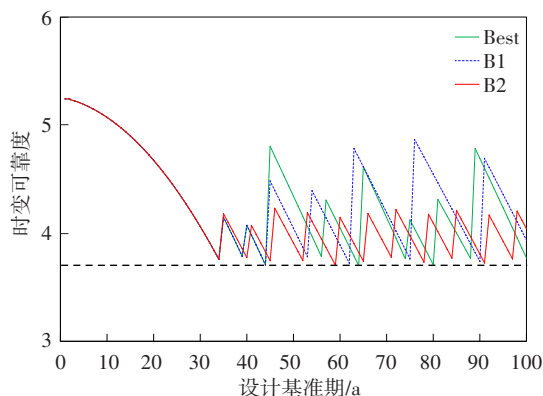


图10 最优决策下的时变可靠度指标

Fig. 10 Time-dependent reliability index under optimal decision

由图11可知,多方法组合下的CO₂排放量与粘贴钢板加固、体外预应力加固方法下的CO₂排放量相近,但是维修成本显著降低;相较于增大截面加固和粘贴纤维复合材料加固方法这两种较为极端的方法,多方法组合的决策更加合理。组合维修活动下的 Best 为最优解:维修成本为14.0万元,CO₂排放量约为4.0×10⁴ kg。最优解的加固次数为8次,在第35年采取增大截面加固方法,在第40、45、57、81、89年采取体外预应力加固方法,在第65年采取钢板加固方法,在第75年采取纤维复合材料加固方法。

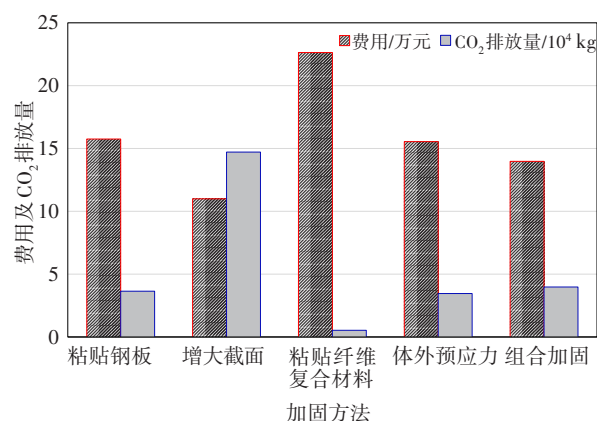


图11 最优费用和CO₂排放量对比

Fig. 11 Comparison of optimal cost and CO₂ emission

4 结论

1) 本文结合维修加固阶段CO₂排放量的计算模型和维修加固成本,建立了基于CO₂排放量和经济成本双目标的桥梁维修加固决策优化模型。

2) 通过比较4种特定的维修加固方法,在桥梁在设计基准期内安全且正常使用的前提下,增大截面加固法费用最低,但CO₂排放量最大;粘贴纤维复合材料法费用最高,CO₂排放量最小。综合考虑环境与维修成本,不能优先考虑增大截面加固法和粘贴纤维复合材料加固法。

3) 基于CO₂排放量和经济成本双目标的桥梁维修加固决策优化模型综合了各项加固方法的特性,很好地协调了桥梁的安全、维修成本及CO₂排放量的关系。在最优维修加固决策中,体外预应力法对桥梁可靠度的提升贡献最大,增大截面法的应用有效地减少了维修成本,粘贴纤维复合材料则可减少CO₂排放量。

参考文献(References):

- [1] 王光远. 结构服役期间的动态可靠度及其维修理论初探[J]. 哈尔滨建筑工程学院学报, 1990(2): 1-9.
WANG Guangyuan. The exploration of theory of decision for the maintenance and repair of structures[J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 1990(2): 1-9.
- [2] FRANGOPOL D M. Life-cycle cost analysis for bridge [M]. Commonwealth of Virginia: American Society of Civil Engineers, 1999: 210-236.
- [3] 秦权. 基于时变可靠度的桥梁检测与维修方案优化[J]. 公路, 2002, 47(9): 17-25. DOI: 10.3969/j.issn.0451-0712.2002.09.006.
QIN Quan. Scheme optimization of bridge detection and repair based on time variant reliability [J]. Highway, 2002, 47(9): 17-25. DOI: 10.3969/j.issn.0451-0712.2002.09.006.
- [4] LIU M, FRANGOPOL D M. Multiobjective maintenance planning optimization for deteriorating bridges considering condition, safety, and life-cycle cost [J]. Journal of Structural Engineering, 2005, 131(5): 833-842. DOI: 10.1061/(asce)0733-9445(2005)131:5(833).
- [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, 46(11): 2013-2019. DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2012.11.012.
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, 46(11): 2013-2019. DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2012.11.012.
- [6] DONG Y. Performance assessment and design of ultra-high performance concrete (UHPC) structures incorporating life-cycle cost and environmental impacts [J]. Construction and Building Materials, 2018, 167: 414-425. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.02.037.
- [7] GOKASAR I, DEVECI M, KALAN O. CO₂ Emission based prioritization of bridge maintenance projects using neutrosophic fuzzy sets based decision making approach [J]. Research in Transportation Economics, 2022, 91: 101029. DOI: 10.1016/j.retrec.2021.101029.
- [8] 国家质量技术监督局, 中华人民共和国建设部. 公路工程结构可靠度设计统一标准: GB/T 50283—1999[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
The State Bureau of Quality and Technical Supervision, Ministry of Construction of the People's Republic of China. Unified standard for reliability design of highway engineering structures: GB/T 50283—1999[S]. Beijing: China Planning Press, 1999.
- [9] NEVES L C, FRANGOPOL D M, CRUZ P S. Cost of life extension of deteriorating structures under reliability-based maintenance [J]. Computers & Structures, 2004, 82(13-14): 1077-1089. DOI: 10.1016/j.compstruc.2004.03.012.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构加固设计规范: GB 50367—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of strengthening concrete structure: GB 50367—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.
- [11] 吴丽. 基于概率的网络层次桥梁最优维护决策研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2010.
WU Li. Research on optimal maintenance decision of network-level bridges based on probability [D]. Changsha: Hunan University, 2010.
- [12] Corporation Volvo-Truck. Emissions from volvo's trucks document available[M]. Gothenburg: Corporation Volvo-Truck, 2018.
- [13] BOUHAYA L, LE-ROY R, FERAILLE-FRESNET A. Simplified environmental study on innovative bridge structure [J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43(6): 2066-2071. DOI: 10.1021/es801351g.
- [14] CANTÚ -PAZ E. A summary of research on parallel genetic algorithms [R]. Urbana: University of Illinois Press, 1997.
- [15] 吕孟伟. 在役钢筋混凝土T梁桥时变可靠度分析[J]. 交通科技与经济, 2019, 21(1): 61-65. DOI: 10.19348/j.cnki.issn1008-5696.2019.01.014.
LYU Mengwei. Time-dependent reliability analysis of the reinforced concrete T-beam bridge in service [J]. Technology & Economy in Areas of Communications, 2019, 21(1): 61-65. DOI: 10.19348/j.cnki.issn1008-5696.2019.01.014.
- [16] 曾尉萍. 火灾后桥梁维修加固设计及施工技术研究[J]. 公路与汽运, 2023(4): 135-138, 142. DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2023.04.027.
ZENG Weiping. Research on design and construction technology of maintenance and reinforcement of rear axle beam in fire [J]. Highways & Automotive Applications, 2023(4): 135-138, 142. DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2023.04.027.

(责任编辑:熊怡)