

可持续发展的项目级桥梁多目标维修决策优化

贺桥¹,雷家艳¹,高婧¹,王华昆¹,张苏娟^{1,2*}

(1. 厦门大学建筑与土木工程学院,福建 厦门 361005;2. 悉尼大学项目管理学院,澳大利亚 悉尼 2037)

摘要: [目的] 在中国桥梁数量快速增长、维护压力增加的背景下,提出科学、可持续的桥梁维修策略愈发重要,本研究响应国家“双碳”政策,旨在探索兼顾经济效益与可持续性的桥梁维修决策方法,以保障桥梁长期安全。[方法] 本研究首次在桥梁维修中引入动态碳排放流模型和碳补偿成本,建立基于可靠度的多目标优化桥梁维修决策模型,采用 NSGA-II 算法,针对具体案例得到了梁维修决策支配解和 Pareto 前沿解,并采用理想点决策方法得到了最优维护方案,获得在经济成本和碳排放方面的优化平衡。[结果] 研究表明,复合维修策略下的 Pareto 前沿解分析揭示了维修总成本与动态碳排放流之间的负相关性,并且为桥梁维护提供了最优方案。在案例中,碳补偿成本占总费用的 4.23%,显示出碳排放成本在整体经济负担中的影响。[结论] 该模型为桥梁全生命周期的维护提供了优化路径,支持桥梁管理在经济成本、结构安全与碳排放之间做出权衡,实现高效、可持续的维修决策。这一成果不仅有助于桥梁的低碳转型,还积极响应了全球气候变化背景下的减碳目标,为交通基础设施的可持续发展提供了理论支持与指导。

关键词: 桥梁维修决策;碳排放;NSGA-II 算法;碳补偿成本

中图分类号: TU 997

文献标志码: A

文章编号: 0438-0479(2025)06-1026-08

Multi-objective maintenance decision optimization of project-level bridge based on the idea of sustainable development

HE Qiao¹, LEI Jiayan¹, GAO Jing¹, WANG Huakun¹, ZHANG Sujuan^{1,2*}

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China; 2. School of Project Management, The University of Sydney, Sydney 2037, Australia)

Abstract: [Objective] Against the backdrop of rapid growth in the number of bridges in China and increasing maintenance pressures, it has become increasingly crucial to propose scientific and sustainable bridge repair strategies. In alignment with the national “dual carbon” policy, this study aims to explore bridge maintenance decision-making methods that balance economic efficiencies with the sustainability, thus ensuring long-term bridge safety. [Methods] For the first time in bridge maintenance, the proposed study introduces a dynamic carbon emission flow model and carbon compensation costs, and establishes a reliability-based multi-objective maintenance decision optimization of project-level bridges. Using the NSGA-II, we obtain the dominant solutions and Pareto front for maintenance decisions in a specific case. By applying the ideal point decision-making method, the optimal maintenance plan is identified, hence achieving a balanced optimization of economic costs and carbon emissions. [Results] Research results indicate that the Pareto front analysis of composite maintenance strategies reveals a negative correlation between total maintenance costs and dynamic carbon emissions, providing an optimal solution for bridge maintenance. In the case study, carbon compensation costs account for 4.23% of the total expenses, so that the impact of carbon emissions on the overall economic burden is highlighted. [Conclusions]

收稿日期: 2024-11-02 录用日期: 2025-05-08

基金项目: 国家自然科学基金(72101220, 72471201); 福建省自然科学基金计划青年创新项目(2022J05001); 厦门市建设局建设科技项目(XJK2022-1-5)

* 通信作者: yzhangsujian@163.com

引文格式: 贺桥, 雷家艳, 高婧, 等. 可持续发展的项目级桥梁多目标维修决策优化[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2025, 64(6): 1026-1033.

Citation: HE Q, LEI J Y, GAO J, et al. Multi-objective maintenance decision optimization of project-level bridge based on the idea of sustainable development[J]. J Xiamen Univ Nat Sci, 2025, 64(6): 1026-1033. (in Chinese)



This model provides a systematic optimization pathway for the lifecycle maintenance of bridges. Then, this pathway supports the bridge management in balancing economic costs, structural safety, and carbon emissions to enable efficient, low-carbon maintenance decisions. This outcome not only facilitates the low-carbon transition of bridges but also actively responds to carbon reduction targets in the context of global climate change. Consequently, theoretical support and practical guidance for the sustainable development of transportation infrastructure are offered.

Keywords: bridge maintenance decision-making; carbon emission; NSGA- II ; carbon compensation cost

《2023 年交通运输行业发展统计公报》表明我国公路桥梁数量从 2001 年的 28.4 万座至 2023 年年末 107.93 万座,实现了 380.0% 的惊人增长。随着桥梁建设的投入,桥梁数量已接近饱和,我国桥梁养护管理正步入“大体量且新旧交替”的时代,科学且可持续的桥梁维修工作显得尤为重要。Biezma 等^[1]指出,由于维修的缺乏,从 1807 到 2007 年全球范围内 5% 的桥梁倒塌,例如 1967 年的 Silver Bridge 等。科学有效的维修策略对于性能恶化的桥梁可以避免灾难性事故的发生。

桥梁作为交通基础设施的重要组成部分,其维修管理需要在性能提升与资金限制、个体影响与社会效益之间找到平衡。桥梁维修的多目标优化通过综合考虑安全性、经济性和风险等因素,制定合理的维修时间表和资金分配方案,从而实现各目标的最优平衡。学者已经对项目级桥梁维修决策多目标优化问题进行了相应的研究。如 Li 等^[2]以钢梁桥为对象,考虑 5 种失效模式,包括梁的弯曲、剪切、挠度和疲劳失效以及混凝土桥面上的氯离子侵蚀,以风险最小为优化目标,通过遗传算法求解获得钢梁桥的最优维修加固方案。Frangopol 等^[3]提出了一种基于寿命预测和维护成本的桥梁管理系统,开发了一种多目标优化方法来最小化整体成本,同时最大化结构性能。Han 等^[4]采用 NSGA- II 算法,成功获取了以最小风险和最小维修成本为目标的钢梁桥最优维修方案。既有研究多采用多目标优化方法和先进算法来提升桥梁维修和加固的决策效率,目标是 minimized 维护成本和风险,同时最大化结构性能和延长桥梁寿命。

随着全球可持续发展战略和我国“双碳”目标的执行,桥梁维修过程中对环境影响的问题逐渐受到关注,最小化碳排放的维修决策有助于推动可持续发展^[5]。在桥梁碳排放研究初期,学者们通常未考虑碳排放的时间价值,仅将各阶段数据简单累加,所得结果仅反映当时的经济水平。随着社会经济的动态发展,碳排放时间价值逐渐受到重视。王银辉等^[6]提出了动态碳排放流模型,通过模拟桥梁全生命周期内各阶段的碳排放,以年度为单位反映碳排放的流入与

流出,展示其随社会经济发展的变化。孙晓燕等^[7]提出将碳补偿转换为环境成本,与工程成本结合进行全生命周期成本分析,以综合收益为准则优化桥梁维修决策。为实现节能减排,需量化桥梁生命周期内各阶段的二氧化碳排放,并将其转换为货币成本,开展全生命周期成本分析。

综上所述,现有的桥梁维修决策研究主要集中于直接经济因素,较少考虑可持续性因素,且忽视了碳排放的时间和经济价值。然而,随着全球对气候变化的关注加深,碳排放及其补偿成本逐渐受到重视。因此,本研究首次引入动态碳排放流模型和碳补偿成本,对桥梁维修周期的成本和可持续性进行更全面的分析。具体而言,本研究以桥梁满足最低性能要求为约束,构建了以动态碳排放流和碳补偿成本最小化为目标的多目标优化模型,并采用 NSGA- II 算法进行求解,分析桥梁设计基准期内的维修加固决策,最后采用改进理想点法进行决策,得出最优方案。研究结果为桥梁生命周期内的绿色低碳管理提供科学依据,推动桥梁在保证结构安全的前提下,实现成本目标和可持续目标的平衡,进一步促进基础设施领域的可持续发展。

1 桥梁维修决策多目标优化问题

桥梁维修策略根据结构性能的实际情况可以分为预防性维修和必要性维修两种类型。本研究所关注的是必要性维修,该方式是在结构达到或接近性能阈值时实施的,目的是恢复或提升桥梁的功能性和安全性^[8]。

本研究以维修成本作为经济指标,该维修成本包含碳补偿成本,以维修过程中产生的动态碳排放流作为可持续性影响指标,以结构的可靠度作为约束条件,构建项目级桥梁多目标维修决策优化模型,如图 1 所示。

1.1 项目级桥梁优化目标函数

1.1.1 维修阶段的动态碳排放流模型

桥梁维修阶段二氧化碳排放量计算分为 3 个阶

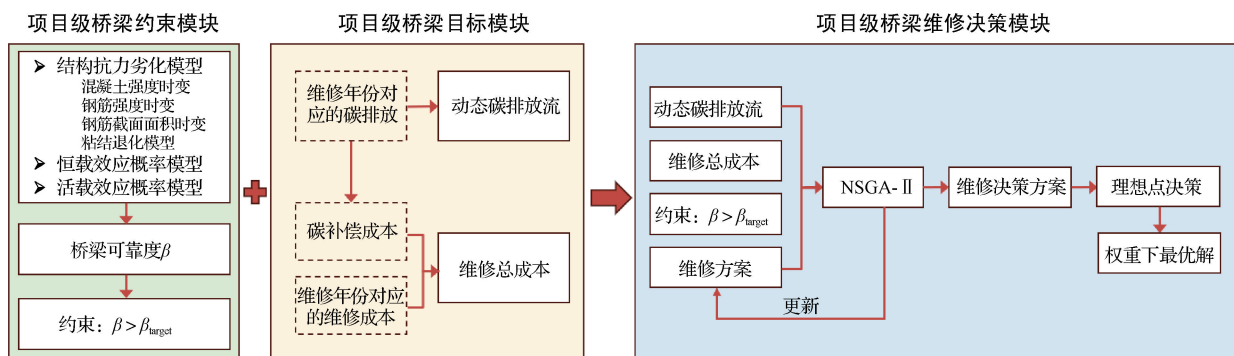


图 1 项目级桥梁多目标维修决策框架

Fig. 1 Multi-objective maintenance decision-making framework for project-level bridges

段,原材料生产制造阶段、材料运输阶段和加固建造阶段^[9].为简化计算,本研究仅考虑加固原材料生产阶段产生的碳排放.

$$cf_{sc} = \sum_{k=1} cf_{sc,k} = \sum_{k=1} cf_{manu,k}, \quad (1)$$

式中: k 为维修加固期间的第 k 次维修; $cf_{manu,k}$ 为第 k 次维修原材料生产制造阶段产生的二氧化碳排放量, cf_{sc} 为桥梁运维阶段的碳排放总量.

二氧化碳排放量可以通过所使用的原材料数量与每种原材料对环境相关的影响相乘来计算^[10].所研究结构的排放量是桥梁维修所用主要材料在单位排放量乘以材料体积的总和.因此在原材料建造阶段的二氧化碳排放量总和为

$$cf_{manu,k} = \sum_{i=1}^{n_m} ce_i \cdot V_i, \quad (2)$$

式中, n_m 为结构所使用的材料的数量; ce_i 为材料生产制造阶段第 i 种材料单位二氧化碳排放量, V_i 为材料生产制造阶段第 i 种材料的用量(m^3).

$$ce_{c,manu} = \sum_{i=1}^{n_{cm}} ma_i \cdot cefm_i, \quad (3)$$

式中: n_{cm} 为结构所使用的材料的原材料的数量; ma_i 为材料中使用的第 i 种原材料的单位用量(kg/m^3), $cefm_i$ 为材料中使用的第 i 种原材料的单位二氧化碳排放量($kg-CO_2/kg$).

结合实际情况,本研究未考虑改变结构体系的加固方法,采用了粘贴钢板加固、增大截面加固、粘贴纤维复合材料加固及体外预应力加固 4 种方式^[9].通过计算得到的不同维修方法对应的碳排放量见表 1,其中: $\Delta\beta$ 为加固后可靠度指标的提升量, α 为可靠度指标的退化率.

动态碳排放流参考了社会对资金时间价值的估量.现金流量图是建设项目评估的关键工具,主要用

于比较不同建设方案,通过展示项目全生命周期中资金的流动状况,帮助评估项目的经济效益.现金流量图能够计算和呈现如净现值、净年值、终值等关键的动态经济评价指标,从而有效地判断项目的可行性以及不同建设方案的优劣.类似于现金流入与流出,建筑碳排放流反映了建设期、运营期及拆除和回收期的碳排放情况.这一概念被称为“建筑碳排放流”^[8].通过这种方式,桥梁的碳排放可以被详细追踪和管理,有助于持续优化其环境表现.

本研究关注运营期间不同维修方案的影响.在模拟碳排放流时,将物化阶段的结束即桥梁投入运营之时设为运营加固期的起始点.研究选取从第 1 年到第 n 年的区间作为运营周期,并将第 n 年确定为拆除报废的时间点.该时间设定有助于精确地模拟和评估桥梁维修全过程的碳排放影响.为了建立动态碳排放流模型,引入社会折现率的概念,社会折现率是公共项目成本效益分析中的一个关键参数,反映了社会对未来收益相对于当前成本的时间偏好.它有助于确定未来收益和成本的现值,为公共政策决策中的跨时期资源分配提供依据和指导^[11].在计算桥梁维修加固期间的碳排放终值时,需从经济角度评估工程项目对环境的影响.通过引入社会折现率 i ,建立动态碳排放流模型,以反映碳排放随社会经济变化的变化,具体模型如下:

$$cf_{dc} = \sum_{k=1} cf_{sc,k} \cdot (1+i)^{T-t_k}, \quad (4)$$

式中: cf_{dc} 为桥梁运营周期末的动态碳排放流, i 为社会折现率, t_k 为第 k 次维修对应的时间, T 为桥梁设计基准期.碳排放的社会折现率应包括无风险自由率和气候变化风险^[12].温日琨等^[13]根据国外研究并结合中国国情,确定无风险自由率为 2.0%,气候变化风险为 1.5%,因此社会折现率取 3.5%.

表 1 维修加固方法的材料用量及相应费用^[9,11]Tab. 1 Material quantities and corresponding costs of maintenance and reinforcement methods^[9,11]

序号	方法	材料种类	材料用量	$\Delta\beta$	α	单价/(元·m ⁻²)	碳排放/(kg·m ⁻²)
1	不维修	无	0	0	0	0	0
2	粘贴钢板加固	钢板	厚度 $t=6$ mm 最小长度 $L=4\ 142$ mm	0.527 4	0.099 0	808	87.14
3			厚度 $t=8$ mm 最小长度 $L=5\ 324$ mm	0.708 4	0.089 3	1 244	116.18
4			厚度 $t=10$ mm 最小长度 $L=6\ 506$ mm	0.949 8	0.096 4	1 680	145.23
5			厚度 $t=12$ mm 最小长度 $L=7\ 688$ mm	1.214 9	0.095 2	2 116	174.27
6			增大截面加固	钢筋混凝土	根数 $n=2$ 增高 $h=200$ mm	0.462 0	0.092 5
7	根数 $n=4$ 增高 $h=200$ mm	0.615 3			0.091 0	846	135.48
8	根数 $n=6$ 增高 $h=200$ mm	0.874 9			0.094 5	1 118	173.72
9	根数 $n=8$ 增高 $h=200$ mm	1.100 5			0.093 3	1 390	211.96
10	粘贴纤维复合材料	碳纤维布	层数 $n=4$	0.210 1	0.081 7	1 280	13.20
11			层数 $n=6$	0.333 8	0.083 3	1 920	19.80
12			层数 $n=8$	0.452 1	0.084 5	2 560	26.40
13			层数 $n=10$	0.581 7	0.086 4	3 200	33.00
14	体外预应力加固	1×7-15.2 mm 钢绞线	束数 $n=2$	0.741 4	0.085 1	1 000	25.91
15			束数 $n=4$	1.278 7	0.079 4	1 500	51.82

1.1.2 考虑碳补偿成本的维修总成本

维修总成本由维修加固成本和碳补偿成本组成,其计算公式如式(5)所示。

$$C_M = C_D + C_C, \quad (5)$$

式中: C_D 为维修加固成本, C_C 为碳补偿成本。

维修加固成本为桥梁服役过程中保障桥梁安全及性能的成本。单座桥梁的维修费用计算中,维修加固的对象是相同的,本研究只考虑不同维修加固方法的工程材料成本,人工费、管理费、设计勘察费和机械使用费等费用不作考虑。工程材料成本计价的形式和方法有许多种,它的主要影响因素有两个,即基本构造要素的单位价格和基本构造要素的实物工程数量。其计算公式如下:

$$\text{工程造价} = \text{工程实物量} \times \text{单位价格}. \quad (6)$$

此外,考虑到时间价值,桥梁维修成本需要折算成现值,可以更准确评估成本并做出决策。本研究引入货币折现率 r 来计算维修加固的成本,取 $r=2\%$ ^[14]。

孙晓燕等^[7]提出碳补偿是指通过购买排放权等外部的碳信用额度来抵消企事业单位的经营活动或是个人的日常生活中所排放的二氧化碳。本研究参考其提出的桥梁全生命周期碳补偿成本模型建立桥梁维修加固期间内碳补偿成本模型如下:

$$C_C = \sum_j C_{\text{env}} C_{\text{CO}_2, k_j} (1+r)^{-k_j}. \quad (7)$$

式中: C_{CO_2, k_j} 为第 k_j 年国际碳交易市场上的碳交易价格, k_j 为第 j 次维修时间, C_{env} 为第 j 次维修所导致的碳排放量。为简化计算,本研究算例忽略其时变性,

以 2024 年国际碳交易欧盟 ETS 标准价格为基准进行核算,查表确认平均为 67.28 欧元/t,折合人民币为 519.07 元/t.

1.2 项目级桥梁性能约束函数

工程结构的可靠度是指在预期使用寿命内结构能够承受预定负载和环境条件,不发生功能失效的能力^[15].由多个构件组合而成的桥梁结构体系通常具有不同的失效模式.即便是某一个构件,其破坏形式也可能各不相同,例如弯曲破坏、剪切破坏等.因此,科学合理的做法是只考虑主要构件及其主要失效模式.对于钢筋混凝土简支梁桥,本文选取主梁跨中弯矩破坏作为主要失效模式.根据可靠度理论及桥梁性能演变概率模型,设构件的抗力函数为 $R(t)$,恒载效应函数为 S_G ,活载效应函数为 $S_Q(t)$,则构件在任意时刻 t 的功能函数可靠性模型可以表示为:

$$Z(t) = R(t) - S_G - S_Q(t). \quad (8)$$

结构抗力是指构件抵御外部荷载的能力,受到材料性质、几何形状及计算模型等多种因素的影响.桥梁在使用期间会因环境和荷载影响而导致混凝土强度下降,钢筋截面积和强度减少,以及混凝土与钢筋的粘结力降低,这些因素直接影响其可靠性和安全性.本研究在构建结构抗力时综合考虑了混凝土强度、钢筋强度、钢筋截面积的时变性以及粘结退化.其抗力模型及后续的恒载与活载效应概率模型参考了文献^[16-19]提出的计算公式,本研究采用时间离散法,每一年分为一个时间段,通过基于 JC 法的可靠度计算程序,对一座在役钢筋混凝土桥梁进行时变可靠度分析.

以桥梁个体的可靠度不低于目标可靠度指标作为项目级桥梁多目标优化的约束条件,其表达式如下:

$$\beta(t) \geq \beta_{\text{target}},$$

式中: $\beta(t)$ 为桥梁第 t 年的可靠度指标, β_{target} 为桥梁的目标可靠度指标.

2 实例分析

前文章节阐述了单座桥梁两大关键优化目标及其对应的约束条件,为验证所述理论,本章将选取典型工程案例开展实例分析.

2.1 概况

民众沥大桥是广东省中山市番中公路上的一座桥梁,公路等级二级,设计基准期为 100 年,设计荷载为公路 II 级,结构安全等级三级.全桥由 16 m 跨径的钢筋混凝土简支 T 梁和 30 m 跨径的预应力混凝土简支 T

梁组成,跨径布置为:6×16 m+1×30 m+6×16 m,桥梁全长 227 m.桥面总宽 15.0 m,布置为:0.50 m(防撞墙)+14.0 m(行车道)+0.50 m(防撞墙).主梁混凝土为 C30,钢筋等级为 II 级,T 梁横断面布置及主梁截面分别如图 2 所示.下面取一片钢筋混凝土 T 梁 1#,进行寿命周期为 100 年的分析计算.

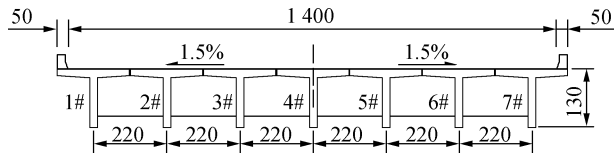


图 2 桥梁横断面图(单位:cm)

Fig. 2 Cross-sectional view of the bridge(unit:cm)

2.2 时变可靠性分析

主梁截面尺寸按竣工图选取(图 3),主梁有效高度 $h_0 = 1100$ mm,梁底宽度 $b = 180$ mm,翼缘宽度 $b_f = 2200$ mm.现场实测数据显示该桥钢筋锈蚀裂缝最大值小于 0.5 mm,故混凝土与钢筋粘结性能退化系数 $k_b = 1.0$.根据桥梁的基本资料,对桥梁的抗力、恒载效应及车辆荷载分别进行分析.其中,抗力的随机变量统计参数、恒载内力以及最不利弯矩的具体数值见表 2.

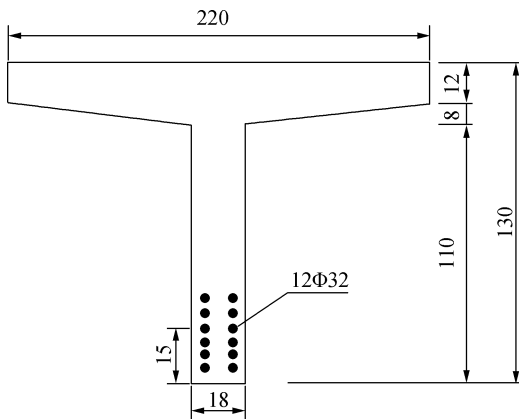


图 3 主梁截面图(单位:cm)

Fig. 3 Cross-sectional view of the main beam(unit:cm)

本桥无维修加固历史,可得恒载集度 $G_k = 2.2 \times (0.05 \times 23 + 0.09 \times 24) + [(0.12 + 0.20) \times 1.01 + 1.3 \times 0.18] \times 25 + 1.800 = 23.912$ (kN/m),

根据桥梁检测结果可知:该桥梁施工质量较差,假定施工评分为 85 分,荷载效应系数为: $c = L^2/8 = 30.031$.

按照现行桥涵设计通用规范计算 1# 主梁在最不利加载工况下跨中最大弯矩为 741.145 kN·m.采用 JC 法计算各主梁在服役期间的时变可靠度,如图 4 所示.

表 2 抗力随机变量统计参数

Tab. 2 Statistical parameters of resistance random variables

随机变量	型号	设计值/ MPa	统计参数		
			μ	σ	δ
混凝土强度 f_c	C30	13.8	1.501 2	0.266 2	0.177 3
钢筋强度 f_s	II 级	280	1.084 9	0.078 0	0.071 9
钢筋锈蚀速率 i_{corr}	均匀	—	2.00	0.30	0.15
计算模式不确定 性参数 K_p	受弯	—	1.00	0.04	0.04

表 3 染色体代码示意

Tab. 3 Chromosome code representation

桥龄	维修加固方案
t	1
$t+1$	15
...	...
$T-1$	1
T	1

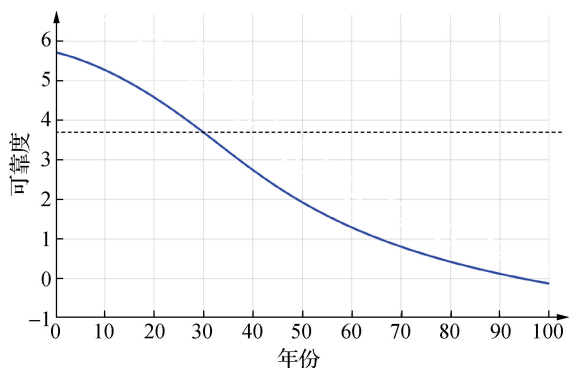


图 4 民众沱大桥 1# 梁可靠性

Fig. 4 Reliability of beam 1 #

根据公路工程结构可靠度设计统一标准,结构安全等级为三级的公路桥梁其目标可靠度应满足延性破坏情况下大于 3.7. 如图 4 所示,1# 梁可靠度指标低于 3.7 的时间为 30 年. 在设计基准期 100 年内,若对桥梁不加干预,则无法满足安全性的要求,因此需要在桥梁时变可靠度低于目标可靠度时对桥梁进行维修加固干预,以保证桥梁的安全及正常通行.

2.3 桥梁维修决策优化

本节基于 NSGA-II 算法,建立以二氧化碳动态排放流和考虑碳补偿成本的经济成本最低为目标的桥梁维修决策模型,以维修加固方案作为设计变量,以满足目标可靠度为约束条件,具体方程如下:

$$\begin{cases} \min C_M = C_D + C_C, \\ \min \sum_{k=1}^n cf_{sc,k} \cdot (1+i)^{T-t_k}, \\ \text{subject: } \beta_i(t) \geq \beta_i, \end{cases} \quad (9)$$

式中 β_i 为桥梁目标可靠度指标,选取 3.7.

桥梁全寿命周期内每年的维护措施构成一个染色体,一条染色体为 1 行 100 列的向量,表示桥梁维修加固周期内的一种方案,如表 3 所示:

多个染色体组成种群,通过配对交叉、变异和非支配排序进行计算,经过多次迭代最终获得优化结果,如图 5 所示. 本实例中,NSGA-II 目标优化遗传算法的设置为:目标个数为 2,种群大小为 500,迭代 200 次(此时结果已趋于收敛),交叉概率为 0.7,变异率为 0.15. 各片梁的支配解和 Pareto 前沿解如图 6 所示.

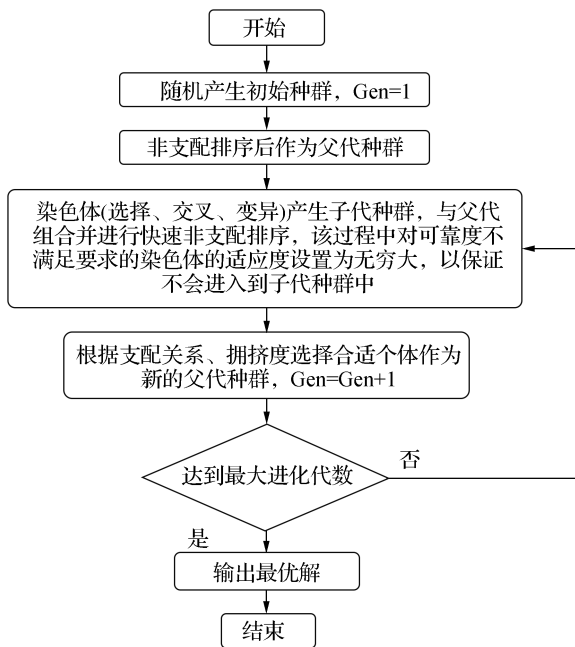


图 5 NSGA-II 流程

Fig. 5 NSGA-II process

图 6 所示梁的 Pareto 前沿解是互相不支配的,意味着在所有目标上没有一个解能够完全优于其他解. 因此,如何从这些 Pareto 解中选择一个具体的解取决于分析和决策者的需求. 本研究采取的方式为将 Pareto 前沿解归一化后计算欧氏距离,选取最低的解为最优解,欧式距离计算如式(10),首先对非支配解对应的各目标值按照式(10)进行归一化处理.

$$f_i^n(X^m) = \frac{f_i(X^m) - f_i^{\min}}{f_i^{\max} - f_i^{\min}}, \quad (10)$$

式中: $f_i^n(X^m)$ 、 $f_i(X^m)$ 分别为第 i 个目标的归一化值

的经济负担.随着可持续发展目标的推进,碳补偿成本的重视变得愈加重要,决策者应关注降低这一成本,通过优化维修加固策略和选择低碳材料,来减轻经济负担,同时提升企业的社会形象和竞争力.

本研究为桥梁维修加固提供了一套科学有效的决策优化工具,能够帮助决策者在多重目标间做出平衡选择.通过构建包含碳补偿成本和动态碳排放流的双目标优化模型,决策者不仅可以关注经济成本,还可以将环境因素纳入考虑,实现更加可持续的桥梁维护策略.这一模型为桥梁在其全生命周期内的维护提供了定量化、系统化的依据,有助于平衡桥梁结构的安全性、经济性和碳排放等,响应全球气候变化背景下的减碳目标.

尽管 Pareto 前沿解为桥梁维修加固策略提供了理论上的最佳组合,但在实际应用中,决策者常需考虑预算限制、施工时间、政策法规等现实约束,这可能限制了理论最优解的实际可行性.未来的研究应结合这些约束条件,进行更精细分析和模型调整,以确保优化结果在实践中的可操作性和实用性.此外,本研究仅分析了动态碳排放流最小和总经济成本最小的方案,未充分考虑决策者的多目标偏好.未来工作可根据决策者需求构建决策模型,从 Pareto 前沿解中选择更符合实际需求的策略,以提升决策的针对性与有效性.同时,由于碳排放计量研究尚不完善,本研究仅统计了材料制造阶段的排放,忽略了维修加固过程中的运输、车辆绕行等排放.未来可以扩展碳排放的统计范围,涵盖维修加固阶段全方位的碳排放估算,并完善不同桥梁类型的维修加固模型,以支持更加全面、科学的决策,推动桥梁可持续发展的研究与应用.

参考文献:

- [1] BIEZMA M V, SCHANACK F. Collapse of steel bridges [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2007, 21(5): 398-405.
- [2] LI L, MAHMOODIAN M, KHALOO A, et al. Risk-cost optimized maintenance strategy for steel bridge subjected to deterioration [J]. *Sustainability*, 2022, 14(1): 436.
- [3] FRANGOPOL D M, SOLIMAN M. Life-cycle of structural systems: recent achievements and future directions [J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2016, 12(1): 1-20.
- [4] HAN X, YANG D Y, FRANGOPOL D M. Risk-based life-cycle optimization of deteriorating steel bridges: investigation on the use of novel corrosion resistant steel [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2021, 24(8): 1668-1686.
- [5] 郑西灵. 桥梁工程碳排放研究现状与发展趋势分析 [J]. *科技与创新*, 2024(10): 134-136, 139.
- [6] 王银辉, 蒋建男, 谢含军, 等. 桥梁工程全寿命周期碳排放流计算与分析 [J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(22): 9605-9614.
- [7] 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加固优化决策 [J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2012, 46(11): 2013-2019.
- [8] NEVES L A C, FRANGOPOL D M, PETCHERDCHOO A. Probabilistic lifetime-oriented multiobjective optimization of bridge maintenance: combination of maintenance types [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2006, 132(11): 1821-1834.
- [9] 中交第一公路勘察设计研究院有限公司. JTG/TJ22—2008 公路桥梁加固设计规范 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2012.
- [10] 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.
- [11] WHIPPLE W Jr. Principles of determining a social discount RATE [J]. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 1975, 11(4): 811-819.
- [12] ACKERMAN F, STANTON E A. Climate risks and carbon prices: revising the social cost of carbon [J]. *Economics*, 2012, 6: 20120010.
- [13] 温日琨, 祁神军. 基于社会碳成本理论的不同结构住宅碳排放流评价 [J]. *生态经济*, 2016, 32(5): 84-88.
- [14] 戴理朝, 康哲, 陈瑞, 等. 基于 NSGA-II 的桥梁网络多目标维修加固决策优化研究 [J]. *土木工程学报*, 2024(1): 1-13.
- [15] 贡金鑫, 仲伟秋, 赵国藩. 工程结构可靠性基本理论的发展与应用(1) [J]. *建筑结构学报*, 2002(4): 2-9.
- [16] 赵尚传, 赵国藩, 贡金鑫. 在役混凝土结构最优剩余使用寿命预测 [J]. *大连理工大学学报*, 2002(1): 83-88.
- [17] 杨伟军, 梁兴文, 张建仁. 服役桥梁评估荷载分析 [J]. *中南公路工程*, 2002(3): 31-33.
- [18] 金伟良, 鄢飞, 张亮. 考虑混凝土碳化规律的钢筋锈蚀率预测模型 [J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2000(2): 46-51.
- [19] 惠云玲, 李荣, 林志伸, 等. 混凝土基本构件钢筋锈蚀前后性能试验研究 [J]. *工业建筑*, 1997(6): 15-19, 58.

(责任编辑:汪 军)