

考虑碳排放的劣化桥梁多目标维修策略优化

韦永华¹, 田仲初²

(1. 中交第二公路工程局有限公司, 陕西 西安 710065; 2. 长沙理工大学 土木与环境工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要:为实现安全、经济、低碳三位一体的桥梁维修新局面,保障桥梁在维护年限内的高效运营,该文基于可靠度理论,得到了劣化桥梁可靠度评估模型;根据碳排放因子法,建立了桥梁维护过程碳排放计算模型,构建了综合考虑桥梁可靠度、维修成本和碳排放的目标函数,依托目标函数并结合桥梁可靠度约束条件,建立了考虑碳排放的桥梁维修策略多目标优化模型。以某桥梁为工程实例,提出了考虑不同权重的桥梁最优维护策略,并对比了单一维修行为与组合维修行为的差异。结果表明:决策者可根据不同需求选择桥梁维修策略,在偏重经济效益的情形下,其维护成本最低,但其可靠度较小;偏重环境影响时,其碳排放量最低,但其可靠度最小;偏重整体性能时,其可靠度最高,但其碳排放量与维护成本均为最大;同等权重时,其碳排放量、维护成本和可靠度均较为均衡;组合维修行为产生的碳排放量与粘贴钢板以及体外预应力法产生的碳排量相当,但组合维修行为的维修费用更低;增大截面法产生的碳排放量最多,而粘贴FRP的碳排量最小,但维修总费用最高。

关键词:桥梁养护;碳排放;维修策略;多目标优化;桥梁可靠度;维修成本

中图分类号:U445.7

文献标志码:A

Multi-Objective Maintenance Strategy Optimization of Deteriorated Bridges Considering Carbon Emissions

WEI Yonghua¹, TIAN Zhongchu²

(1. CCCC Second Highway Engineering Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710065, China; 2. School of Civil and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China)

Abstract: In order to realize the new situation of safe, economic, and low-carbon bridge maintenance and ensure the efficient operation of the bridge during the maintenance period, the reliability evaluation model of the deteriorated bridge was obtained based on the reliability theory. According to the carbon emission factor method, the carbon emission calculation model of the bridge maintenance stage was established. An objective function considering bridge reliability, maintenance cost, and carbon emission was constructed. Based on the objective function and bridge reliability constraints, a multi-objective optimization model of bridge maintenance strategy considering carbon emission was formed. By taking a bridge as an engineering example, the optimal maintenance strategies considering different weights were obtained, and the single maintenance behavior and the combined maintenance behavior were compared. The results show that decision-makers can choose bridge maintenance strategies according to different needs. In the case of emphasizing economic benefits, the maintenance cost is the lowest, but the reliability is small. When the environmental impact is emphasized, its carbon emission is the lowest, but its reliability is the lowest. When the overall performance is emphasized, its reliability is the highest, but its carbon emissions and maintenance costs are the highest. With the same weight, its carbon emission, maintenance cost, and reliability are more balanced. The carbon emission of combined maintenance behavior is similar to that of pasted steel plate and external prestressing method, but the maintenance cost of combined maintenance behavior is smaller. The increased section method produces the most carbon emissions, and the pasted FRP has the least carbon emissions, but the total maintenance cost is the highest.

收稿日期:2025-08-30 修回日期:2025-10-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51478049);中国路桥工程有限责任公司科技项目(编号:P2240479)

作者简介:韦永华,男,高级工程师,E-mail:7653800@qq.com

Keywords: bridge maintenance; carbon emission; maintenance strategy; multi-objective optimization; bridge reliability; maintenance cost

0 引言

交通网络的良好运行对地区的社会和经济至关重要。公路桥梁是交通网络中最关键的组成部分,发生故障将严重降低交通网络的整体性能。在恶劣的服役环境以及不断增加的交通负载作用下,桥梁结构性能会逐渐退化,退化的桥梁结构必须进行及时和充分的维护,以确保其安全性和正常使用^[1-2]。与此同时,在碳达峰碳中和战略的背景下,基于可持续发展理念,桥梁维修加固阶段产生的碳排放开始日益受到重视。因此,对考虑碳排放的劣化桥梁的维修策略进行多目标优化具有重要意义。

结构安全与经济成本是桥梁维护决策中两个经典且核心的控制指标^[3]。在此领域,国内外研究经历了从单一目标控制到多目标协同优化的清晰演进。早在1995年,Thoft-Christensen等^[4]便开创性地将可靠度理论引入桥梁管理系统,奠定了以结构安全为核心的维护决策基础。此后,研究者们逐渐意识到纯粹的安全目标可能导致维护成本过高,进而将生命周期成本(LCC)纳入考量,进入了安全-经济二元权衡的研究阶段。例如,Barone等^[5]以生命周期维护成本和年故障率为优化目标,对老化桥梁维护策略进行了多目标优化;Dong等^[6]、Kim等^[7]和Safi等^[8]也相继提出了融合生命周期成本与结构可靠度的桥梁维护决策方法,标志着该领域理论的成熟;Biondini等^[9]对这些研究进行了系统回顾,指出尽管基于生命周期可靠度与成本的多目标优化方法已取得长足发展,但其在工程实践中的广泛应用仍需进一步推进。然而,纵观上述演进历程不难发现,现有体系的优化目标大多围绕着“安全”与“经济”这两个维度展开,尚未能充分响应可持续发展对基础设施领域提出的新要求。

与此同时,在全球“碳达峰碳中和”战略背景下,基础设施建设与运维的低碳化已成为必然趋势。学术界对桥梁工程碳排放的关注起初集中于材料生产与施工建设阶段^[10-11]。近年来,学者们也逐渐认识到运营维护阶段因材料消耗与机械作业所产生的长期、累积碳排放不容忽视,并开展了一系列研究^[12]。其中,一部分研究致力于建立桥梁运维阶段的碳核算方法与清单数据库,为量化该阶段碳足迹提供了

重要基础^[13-14];另一部分研究则尝试将碳排放纳入桥梁设计或维护方案的比选评估中^[15-16]。然而,将碳排放作为一个独立的优化目标,在维修决策伊始便与可靠度、成本置于同等地位进行协同优化,而不仅仅是作为事后评估的指标,此类研究在桥梁运维领域仍相对少见。这导致当前的决策体系难以系统性地平衡结构性能、经济效益与环境影响三者间的复杂关系。因此,本文旨在突破传统安全-经济二元框架,将碳排放从核算层面提升至决策优化层面,构建一个综合考虑可靠度、维修成本与碳排放的桥梁维修策略多目标优化模型,以推动实现安全、经济、低碳三位一体的桥梁运维新局面。

本文基于可靠度理论,得到了劣化桥梁可靠度评估模型;根据碳排放因子法,建立了桥梁维护阶段的碳排放计算模型,构建了综合考虑桥梁可靠度、维修成本和碳排放的目标函数,依托目标函数并结合桥梁可靠度约束条件,形成了考虑碳排放的桥梁维修策略多目标优化模型。以某桥梁为工程实例,研究了不同权重下的桥梁最优维护策略,并对单一维修行为与组合维修行为进行了对比。

1 劣化桥梁可靠度评估模型

为实现将结构安全从约束条件转化为可量化的优化目标,首先需要建立能够反映桥梁在维修干预下时变性能的可靠度评估模型。本节基于可靠度理论,旨在为后续多目标优化提供关键的性能状态输入,结构可靠度功能函数 Z 可表示为:

$$Z = g(R, S) = R - S \quad (1)$$

式中: Z 为功能函数; R 、 S 分别为结构抗力、荷载效应;结构荷载效应通常分为恒载效应 S_G 和活载效应 S_Q 。

假设 R 、 S 服从正态分布,那么,结构失效概率可表示为:

$$P_f = P(Z < 0) = \int_{-\infty}^0 \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Z} \exp\left[-\frac{(z - \mu_Z)^2}{2\sigma_Z^2}\right] dz = \Phi\left(-\frac{\mu_Z}{\sigma_Z}\right) \quad (2)$$

$$\mu_Z = \mu_R - \mu_S \quad (3)$$

$$\sigma_Z = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2} \quad (4)$$

式中: μ_R 、 μ_S 、 μ_Z 分别为R、S、Z的均值; σ_R 、 σ_S 、 σ_Z 分别为R、S、Z的标准差。

令结构可靠度指标 $\beta = \mu_Z / \sigma_Z$,则 β 可进一步表示为:

$$\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad (5)$$

1.1 结构抗力退化概率模型

桥梁在服役过程中,往往会受外部环境侵蚀而引起结构材料性能的退化,进而影响结构抗力^[17]。为此,本文将考虑钢筋和混凝土的强度退化、两者的黏结性能退化以得到结构抗力退化计算表达式(以T梁为例),如式(6)所示,其中材料性能的退化规律可参照文献^[18]进行分析。

$$R(t) = k_b f_s(t) A_s(t) \left[h_0 - \frac{f_s(t) A_s(t)}{2f_c(t)b} \right] \quad (6)$$

式中: k_b 为钢筋与混凝土的黏结性能退化系数; t 为桥梁服役时间; f_s 、 A_s 分别为钢筋抗拉强度、截面面积; f_c 为混凝土抗压强度; h_0 为截面有效高度; b 为截面宽度。

将 f_s 、 A_s 、 f_c 视为随机变量,根据误差传递原理^[19],结构抗力统计参数可通过式(7)、(8)进行计算:

$$\mu_{R(t)} = k_b \mu_{f_s(t)} \mu_{A_s(t)} \left[h_0 - \frac{\mu_{f_s(t)} \mu_{A_s(t)}}{2\mu_{f_c(t)} b} \right] \quad (7)$$

$$\sigma_{R(t)} = \sqrt{\left(\frac{\partial R(t)}{\partial f_s(t)} \right)^2 \sigma_{f_s(t)}^2 + \left(\frac{\partial R(t)}{\partial f_c(t)} \right)^2 \sigma_{f_c(t)}^2 + \left(\frac{\partial R(t)}{\partial A_s(t)} \right)^2 \sigma_{A_s(t)}^2} \quad (8)$$

式中: $\mu_{R(t)}$ 、 $\mu_{f_s(t)}$ 、 $\mu_{A_s(t)}$ 、 $\mu_{f_c(t)}$ 分别为服役 t 年后 R 、 f_s 、 A_s 、 f_c 的均值; $\sigma_{R(t)}$ 、 $\sigma_{f_s(t)}$ 、 $\sigma_{A_s(t)}$ 、 $\sigma_{f_c(t)}$ 分别为服役 t 年后 R 、 f_s 、 A_s 、 f_c 的标准差。

1.2 恒载效应概率模型

由于钢筋锈蚀以及混凝土碳化等外部因素的影响,桥梁在服役过程中的自重仍会发生不确定变化。相关研究表明^[20],结构恒载及效应服从正态分布,那么,其恒载分布函数可表示为:

$$F_G(x) = \frac{1}{0.0437 G_K \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp \left[-\frac{(u - 1.0148 G_K)^2}{0.0038 G_K^2} \right] du \quad (9)$$

进一步,恒载的均值 μ_G 与标准差 σ_G 可分别表示为:

$$\mu_G = 1.0148 r_d r_u G_K \quad (10)$$

$$\sigma_G = 0.0437 r_d r_u r_z G_K \quad (11)$$

式中: G_K 为考虑维修加固的恒载标准差; r_d 、 r_u 分别为考虑维修加固以及恒载变化的影响系数; r_z 为折减系数。

1.3 活载效应概率模型

桥梁结构的活载效应主要有汽车荷载、风荷载以及人群荷载等,其中汽车荷载对活载效应影响最大,故主要考虑汽车荷载的影响,汽车荷载效应 S_Q 的计算表达式如式(12)所示:

$$S_Q = K_{SQK} K_{SQ} S_{QK} \quad (12)$$

式中: K_{SQK} 为修正系数; S_{QK} 为汽车荷载效应标准差; K_{SQ} 为实际效应值与标准效应值的比值。

根据误差传递理论, S_Q 的均值 μ_{S_Q} 与标准差 σ_{S_Q} 可分别表示为:

$$\mu_{S_Q} = K_{SQK} S_{QK} \mu_{K_{SQ}} \quad (13)$$

$$\sigma_{S_Q} = K_{SQK} S_{QK} \sigma_{K_{SQ}} \quad (14)$$

式中: $\mu_{K_{SQ}}$ 为设计基准期内的汽车恒载效应均值; $\sigma_{K_{SQ}}$ 为设计基准期内的汽车恒载效应标准差,可根据文献^[21]计算得到。

2 桥梁维修加固的碳排放计算模型

为将低碳目标从理念转化为可优化、可比较的量化指标,需要构建维修活动的碳排放计算模型。与仅关注材料生产的简化模型不同,本文建立的模型旨在系统核算维修全过程的碳足迹,为优化提供核心的环境影响输入。碳排放是指排放在地球大气层中的温室气体,包括 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 、 HFC_s 、 SF_6 、 PFC_s 等,其中 CO_2 在大气中的含量最多并且是造成温室效应的最主要因素^[22],因此本文以 CO_2 为研究对象,探讨维修加固对环境的影响。

桥梁维护阶段碳排放分析主要是对桥梁运营维护阶段的碳排放进行清单式量化分析,确定桥梁维护期间影响碳排放量的主要因素,得到桥梁维护阶段在不同维护措施、不同维护时间下的碳排放量化结果,从而为桥梁维护阶段的碳排放分析提供数据支持,为既有桥梁的维修养护提供理论参考。对于桥梁的加固方法,本文主要考虑增大截面法、体外预应力法、粘贴钢板法以及粘贴纤维复合材料(FRP)法。

对于碳排放量的计算,本文采用碳排放因子法,该方法的核心思路是用某种能源的消耗量乘以相应

的碳排放因子对核算对象的碳排放量进行计算。

桥梁维修产生的碳排放量主要包括:材料生产阶段、运输阶段以及维修加固施工阶段产生的碳排放量,如式(15)所示:

$$Q_m = \sum_{i=1}^n (Q_{m1}^i + Q_{m2}^i + Q_{m3}^i) \quad (15)$$

式中: n 为维修次数; Q_{m1}^i 、 Q_{m2}^i 、 Q_{m3}^i 分别为第*i*次维修中材料生产阶段、运输阶段以及维修加固施工阶段产生的碳排放量。

核算材料生产阶段的碳排放不仅需定量计算原材料对环境的影响,还应考虑回收材料而减少的碳排放,如式(16)所示:

$$Q_{m1} = \sum_j [M_j \cdot \beta_j \cdot (1 - \eta_j)] \quad (16)$$

式中: M_j 为材料*j*的消耗量; β_j 为材料*j*的碳排放因子,具体取值见表1^[23-24]; η_j 为可回收材料*j*的回收系数,其中钢材取0.80,混凝土取0.55^[25]。

表1 桥梁维护阶段不同维修加固措施的碳排放因子^[23-24]

Table 1 Carbon emission factors of different maintenance and reinforcement measures in bridge maintenance stage^[23-24]

建筑材料名称	CO ₂ 排放因子
碳纤维	3.12
钢绞线	1.23
钢板	1.23
结构胶	4.78×10^{-3}
C40混凝土	456.43
C50混凝土	509.23

桥梁维护阶段原材料运输过程中的碳排放主要与运输方式和运输距离有关,其中运输方式主要分为公路运输、铁路运输、水路运输以及航空运输,桥梁维护加固阶段的原材料运输通常采用公路运输,故该阶段仅考虑公路运输,原材料运输阶段产生的碳排放可表示为:

$$Q_{m2} = \sum_j [T_p \cdot B_j \cdot L_j] \quad (17)$$

式中: T_p 为材料运输过程的碳排放因子,公路运输的碳排放因子为0.155 3^[26]; L_j 为材料*j*的平均运距; B_j 为材料*j*的总重量。

维修加固施工阶段的碳排放包括使用机械设备所产生的碳排放以及使用机械设备产生的能源消耗,由于施工机械设备折旧期较长且并不是工程实体,故不考虑制造机械设备所产生的碳排放,因此维

修加固施工阶段的碳排放主要考虑使用机械设备产生的能源消耗,如式(18)所示:

$$Q_{m3} = \sum_d \gamma_d \cdot N_d \cdot X_d \quad (18)$$

式中: γ_d 为施工设备*d*的碳排放因子; N_d 为施工设备*d*的数量; X_d 为施工设备*d*的台班量。

桥梁维修加固施工阶段机械设备的能源消耗主要以柴油、汽油以及电力为主,因此本文主要对涉及此三类能源的机械设备进行分析,参考《公路工程机械台班费用定额》以及《公路建设期碳排放计算方法》可计算得到桥梁维修加固阶段每台班机械设备的碳排放因子,如表2所示。

表2 桥梁维修加固阶段主要施工设备的碳排放因子

Table 2 Carbon emission factors of main construction equipment in bridge maintenance and reinforcement stage

施工设备名称	总碳排放因子/(t CO ₂ eq·台班 ⁻¹)
混凝土搅拌机	0.027 3
混凝土输送泵	0.195 0
交流电弧焊机	0.077 3
预应力拉伸机	0.013 0
载货汽车	0.091 2
起重机	0.092 1

3 桥梁维修加固成本计算模型

经济性是维修决策的经典核心。为与性能、环境目标在统一框架下进行权衡,需要建立一个全面考虑直接维修成本与间接社会成本的综合经济模型,本节模型将为优化提供直接的经济性输入。

在满足桥梁结构安全的情况下,通过最大限度地减少总成本,可以极大地实现资源合理分配。桥梁维护成本分为直接成本和间接成本,其中直接成本主要为维修加固产生的成本,间接成本主要为桥梁维修期间车辆绕行成本以及车辆绕行产生的时间成本,见式(19):

$$C = C_{mi} + C_r + C_n \quad (19)$$

式中: C_r 为绕行成本,具体求解见式(20); C_{mi} 为采取维修加固措施*i*产生的成本; C_n 为时间成本,见式(21)。

$$C_r = C_v \cdot L_d \cdot T_{AADT} \cdot d_d \quad (20)$$

$$C_n = \left[C_{ad} \cdot O_{car} \cdot \left(1 - \frac{T_p}{100} \right) + C_{trk} \cdot \frac{T_p}{100} \right] \frac{L_d \cdot T_{AADT} \cdot d_d}{v} \quad (21)$$

式中: C_{ad} 、 C_{trk} 分别为行人和车辆绕行单位时间的成

本; C_v 、 v 分别为平均绕行成本与绕行速度; d_d 为桥梁封闭天数; L_d 为绕行路程; T_{AADT} 为车流量日均值; O_{car} 为轿车使用率; T_p 为卡车占过桥车辆总数的百分比。

由于桥梁运营期时间跨度较长, 并且货币具有时间效应, 故需考虑资金投入的时间成本, 即通过折算将未来的货币绝对值折算成当前的货币值, 考虑折现率的桥梁维护成本见式(22):

$$C_t = \frac{1}{(1+r_d)^t} \cdot C \quad (22)$$

式中: C_t 为净现值; r_d 为货币折现率。

4 桥梁维修策略优化模型建立及求解

4.1 多目标优化模型建立

考虑碳排放的桥梁维护策略优化主要是为了平衡桥梁高性能运营、低碳与有限维护成本之间的矛盾。本文桥梁维护策略优化目标为: 在维护年限内, 桥梁可靠度指标最大, 并使其综合维护成本和碳排放量最低。约束条件为: 桥梁可靠度 \geq 目标可靠度。多目标优化模型见式(23):

$$\begin{cases} \max \beta(t) \\ \min C = C_{mi} + C_r + C_n \\ \min Q_m = \sum_{i=1}^n (Q_{m1}^i + Q_{m2}^i + Q_{m3}^i) \\ \text{subject to : } \beta(t) \geq \beta_{\text{target}}, (0 \leq t \leq T) \end{cases} \quad (23)$$

式中: T 为维护年限, 取 100 年; β_{target} 为桥梁目标可靠度指标, 本文取 3.7。

4.2 多目标优化问题求解

考虑碳排放的桥梁维护决策多目标优化问题的求解是一个极其复杂的过程, 维护策略的组合极多。因此, 对该问题的求解, 需选择一种计算效率高、收敛性与鲁棒性好的算法。

本文采用第二代非支配排序遗传算法^[25](NSGA-II)对多目标优化模型进行求解。NSGA-II 算法是由 Deb 等基于 NSGA 算法基本框架提出的, 该算法的计算效率和鲁棒性较 NSGA 算法均有一定提高, 可较好地适用于多目标优化问题的求解。其优化流程见图 1。

多目标优化算法得到的最终结果是 Pareto 最优解集, 其中每个非支配解均为各目标函数之间相互权衡的表征。因此, 需要对多目标算法得到的最优解集进行处理以得到相对最优解。基于此, 本文采用逼近理想解排序法(TOPSIS法)从最优解集中计

算得到目标权重的相对最优解, 该方法主要是根据 Pareto 最优解集与理想解的相对贴近距离来判断解的优越性。

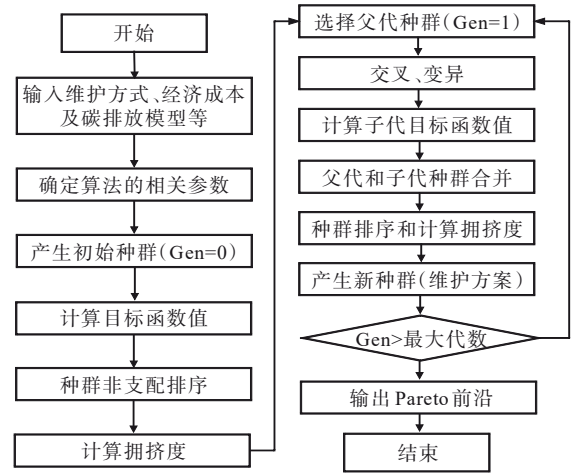


图 1 基于 NSGA-II 算法的多目标优化流程

Figure 1 Multi-objective optimization process based on NSGA-II algorithm

由于一部分目标是越小越好(称为成本型指标), 如综合维护成本、碳排放量; 另一部分则是越大越好(称为效益型指标), 如桥梁可靠度, 此时很难直接利用距离来评价解的优越性, 故应把成本型指标转化为效益型指标, 如式(24)所示:

$$x' = x_{\max} - x \quad (24)$$

式中: x' 为转化后的指标值; x 为成本型指标值; x_{\max} 为指标 x 的最大值。

对各个解的指标值进行归一化处理可得:

$$x_{ij} = \frac{x'_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^M (x'_{ij})^2}}, j = 1, 2, \dots, m \quad (25)$$

式中: x_{ij} 为解集 i 在优化目标 j 上的指标值; M 为优化目标个数; m 为解的数量。

进一步, 可确定正理想解 A^+ 和负理想解 A^- :

$$\begin{aligned} A^+ &= [\max\{x_{11}, x_{21}, \dots, x_{n1}\}, \max\{x_{12}, x_{22}, \dots, x_{n2}\}, \dots, \\ &\quad \max\{x_{1M}, x_{2M}, \dots, x_{nM}\}] = (A_1^+, A_2^+, \dots, A_M^+) \\ A^- &= [\max\{x_{11}, x_{21}, \dots, x_{n1}\}, \max\{x_{12}, x_{22}, \dots, x_{n2}\}, \dots, \\ &\quad \max\{x_{1M}, x_{2M}, \dots, x_{nM}\}] = (A_1^-, A_2^-, \dots, A_M^-) \end{aligned} \quad (26)$$

那么, 各解与正理想解 A^+ 和负理想解 A^- 之间的绝对距离可分别表示为:

$$D_j^+ = \sqrt{\sum_{i=1}^M \omega_i (A_i^+ - x_{ij})^2}, j = 1, 2, \dots, m$$

$$D_j^- = \sqrt{\sum_{i=1}^M \omega_i (A_i^- - x_{ij})^2}, j = 1, 2, \dots, m$$
(27)

式中: ω_i 为第*i*个优化目标的权重。

根据式(27),可计算得到第*i*个解与 A^+ 之间的相对距离,如式(28)所示:

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-}, 0 < C_i < 1, i = 1, 2, \dots, m$$
(28)

式中:最大 C_i 值所对应的非支配解即为全局最优解。

5 实例分析

5.1 工程概况

本文以某跨径为 3×30 m的预应力混凝土连续T梁桥为工程实例,该桥横向布置5片梁,桥面宽为12.25 m,主梁采用C50混凝土,设计荷载等级为公路-I级,设计使用年限为100年。该桥主梁横断面如图2所示。

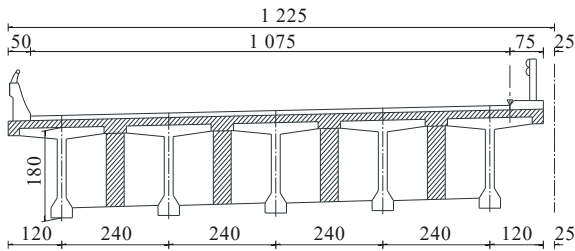


图2 算例桥梁主梁横断面示意图(单位:cm)

Figure 2 Schematic diagram of bridge's main beam cross-section (unit: cm)

为明晰优化模型的起点与作用,本案例设定如下初始条件:

(1) 初始可靠度:根据第1节模型,基于设计参数计算,该桥在建成时刻($t=0$ 年)的初始可靠度指标为5.2。

(2) 环境荷载条件:该桥位于一般大气环境,活载模型采用《公路桥梁设计通用规范》(JTG D60—2015)中的公路-I级荷载,恒载效应按正态分布考虑,其变异系数取0.1。

(3) 初始退化状态:本文从桥梁建成后开始计算。假定在优化起始时刻($t=0$ 年),结构尚未发生明显材料性能退化,即钢筋与混凝土的黏结性能退化系数为1.0,材料强度取其设计名义值。后续的性能退化将严格依据本文1.1节所述的概率模型随时间发展。

根据算例桥梁的特点及所处位置,参考《公路工程机械台班费用定额》《公路工程施工阶段碳核算指南》,得到不同维修措施的工程量参数,如表3所示。

表3 维修措施工程量参数

Table 3 Quantity parameters for maintenance measures

维修措施	混凝土用量/ m^3	钢材用量/t	碳纤维维/ m^2	结构胶/kg	机械台班/班次	平均运距/km	单次施工周期/d
增大截面法	85.2	12.1	—	—	18	200	25
体外预应力	—	8.7	—	—	22	250	18
粘贴钢板法	—	5.3	—	480	15	180	12
粘贴FRP法	—	—	220	360	8	300	10

5.2 多目标优化结果分析

基于NSGA-II算法,以桥梁可靠度最大、维护成本最少和碳排放量最低为优化目标,寻求桥梁维修的最佳时间和维修措施,Pareto最优解集如图3所示。该图为桥梁维护阶段碳排放、维护成本和可靠度之间相互权衡的结果,不同的解对应着不同的碳排放量和整体性能,同时也需要投入相应的资金来维护桥梁的整体服务水平。

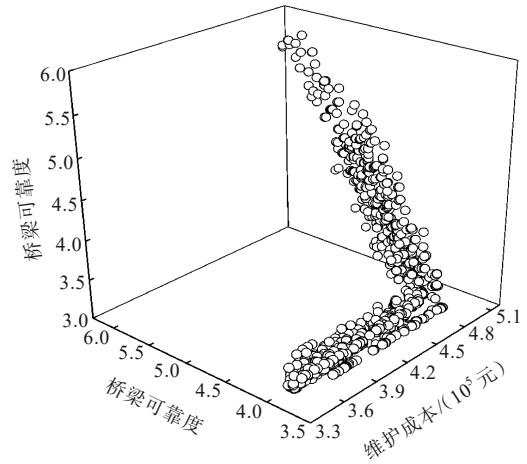


图3 Pareto最优解集

Figure 3 Pareto optimal solution set

由于Pareto最优解集分布广泛,繁多的非劣解集给决策者增加了甄选最优解的压力。为此,本文将不同优化目标赋予不同权重,讨论各权重下的最佳维护策略,具体权重分配情况如下所述。

工况1:偏重于经济效益,表明决策者更加偏向于维护成本最小,故将其权重设置为0.6,同时也意味着碳排放量最小以及可靠度最大的权重将随之减小,其权重分别设置为0.2和0.2。

工况2:偏重于环境影响,表明决策者更加偏向

于碳排放量最小,故将其权重设置为0.6,可靠度最大、维护总成本最低的权重分别设置为0.2和0.2。

工况3:偏重于整体性能,表明决策者更加偏向于可靠度最大,故将其权重设置为0.6,维护总成本最低、碳排放量最小的权重分别设置为0.2和0.2。

工况4:同等权重,表明决策者对可靠度最大、维护总成本最低和碳排放量最小没有偏重,故将其权重分别设置为1/3、1/3和1/3。

为系统揭示不同决策偏好对最优策略的影响,本研究参考相关多目标决策研究中的常见做法^[27],设定了4种具有代表性的权重分配工况,以表征决策者对经济、环境与性能的不同偏重程度。随后,采用4.2节所述的TOPSIS法,根据不同工况下各优化目标所对应的权重比例,从Pareto最优解集中筛选得到相应的最优解,如表4所示。

表4 不同工况下的桥梁最优维护策略

Table 4 Optimal maintenance strategies of bridges under different working conditions

工况	碳排放量/ (10 ⁵ kg)	维护成本/ (10 ⁶ 元)	桥梁可靠度
工况1(经济效益)	3.083 4	3.409 6	4.004 0
工况2(环境影响)	2.813 3	3.684 1	3.951 9
工况3(整体性能)	3.493 9	4.442 4	4.269 2
工况4(同等影响)	3.233 5	3.846 4	4.111 7

表5清晰地揭示了不同决策偏好下各目标的具体权衡关系与妥协代价:当偏重经济效益时(权重0.6),维护成本最低(3.409 6×10⁶元),但为了实现这一经济性,可靠度指标需降至4.004 0,同时碳排放量升至3.083 4×10⁵ kg。当偏重环境影响时(权重0.6),碳排放量可降至最低(2.813 3×10⁵ kg),但这是以可靠度指标降至研究案例中的最低值(3.951 9)以及成本增至3.684 1×10⁶元为代价的。当偏重整体性能时(权重0.6),可获得最高的可靠度(4.269 2),但相应地需承担最大的环境代价(碳排放3.493 9×10⁵ kg)与经济代价(成本4.442 4×10⁶元)。在同等权重时(权重各为1/3),所得策略的各项指标(可靠度4.111 7,成本3.846 4×10⁶元,碳排放3.233 5×10⁵ kg)确实处于上述极端偏好之间的一个均衡区间,验证了其作为折中方案的合理性。

为更加具体阐述各工况下的维护方案,图4、5分别给出了不同工况下桥梁维修费用与碳排放量随时间的变化情况。

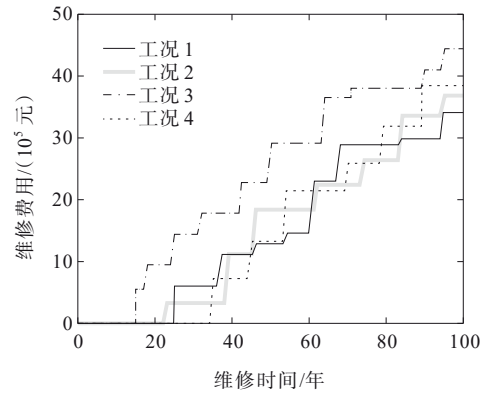


图4 桥梁维修费用分析图

Figure 4 Bridge maintenance cost analysis diagram

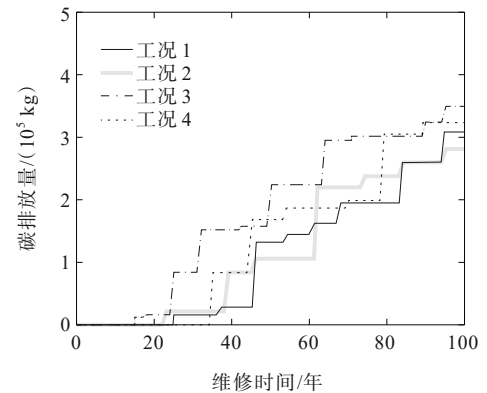


图5 桥梁碳排放量分析图

Figure 5 Carbon emission analysis diagram of bridge

从图4、5可以看出:不同工况下的桥梁维修策略差别较大,其中,工况3的开始维修时间最早,并且维修次数最多,其碳排放及维修成本也最高,主要是由于该策略需通过对桥梁进行不断维修加固以保证其整体性能;工况2的维修次数最少,其维修费用也最少。

为探讨不同权重分配对最优解的影响,验证上述结论的稳健性,本文进行了权重敏感性分析,权重敏感性分析雷达图见图6。

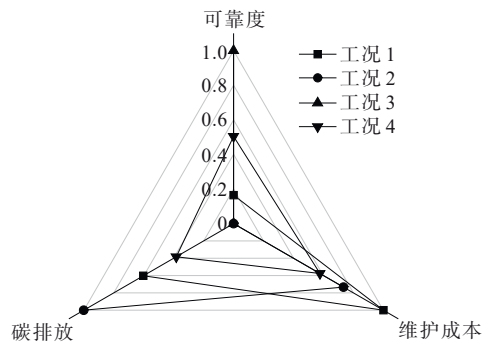


图6 权重敏感性分析雷达图

Figure 6 Radar chart of weighted sensitivity analysis

由图6可知:尽管具体数值随权重连续变化,但最优解的分布呈现出一定规律:当权重向某一目标倾斜时,该目标值总是位于最优水平,而其余两个目标则需做出妥协,验证了5.2节中基于4种典型工况所得出的核心结论是稳健且具有代表性的。特别是在权重均衡(各约1/3)的区域,解的各项指标始终处于中心平衡位置,证明了工况4作为折中推荐方案的合理性。

5.3 单一维修行为与组合维修行为对比

本文分别对比了各单一维护行为与组合维护行为下的桥梁可靠度、碳排放量以及维修成本,结果如图7、8所示。其中,单一维护行为指对桥梁分别仅采用增大截面、体外预应力、粘贴钢板以及粘贴FRP的加固方式,组合维修以工况4为例进行分析。

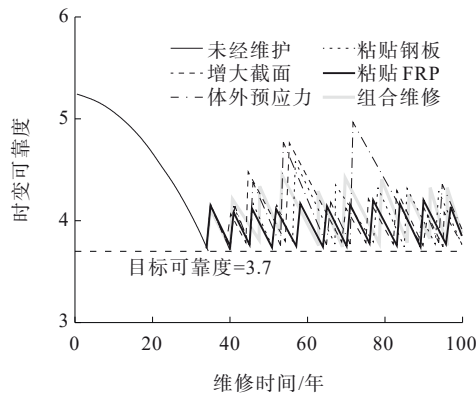


图7 不同维修行为下的桥梁时变可靠度

Figure 7 Time-varying reliability of bridges under different maintenance behaviors

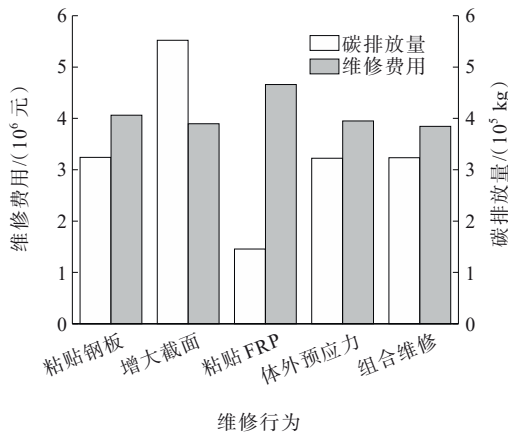


图8 不同维修行为下的维修费用与碳排放量对比

Figure 8 Comparison of maintenance cost and carbon emission under different maintenance behaviors

需要说明的是,组合维修行为具体时间点的确定,并非人为预设,而是本文所建多目标优化模型自

动寻优的结果,具体为:NSGA-II算法在给定的100年维护期内,随机生成大量可能的维修策略(即包含了维修时间点和维修方法的组合),并通过迭代进化,不断筛选出能使可靠度更高、成本更低、碳排放更少的策略。最终,通过TOPSIS法从Pareto最优解集中选出的全局最优解,其自然包含了一系列具体的维修干预时间点和对应的最优维修方法,该全局最优解即为组合维修行为。图8中组合维修行为的碳排放量与维修费用,是根据具体的维修方案(在第34年采用增大截面法,在第40、47、52、68、89、96年采用体外预应力法,在第62年采用粘贴钢板法,在第78年采用粘贴FRP法),将该策略下每一次维修所消耗的材料、机械台班、运输距离等工程量参数代入第2节碳排放计算模型和第3节维修加固成本计算模型,分别计算出每一次维修的碳排放和成本,最后在100年维护期内累加得到。

由图7可知:所有单一维修方法在首次加固后,可靠度指标均未能恢复到初始值($\beta_0=5.2$),这反映了既有结构性能退化的不可逆性及维修加固的局限性。其中,增大截面法在实施后提供了最显著且持久的可靠度提升,这是因为它从根本上增大了结构构件的截面尺寸和配筋率,直接提升了结构抗力。粘贴FRP法虽然初期提升效果明显,但其可靠度衰减速率较快,这可能与FRP材料的蠕变退化或其长期荷载与环境作用下的界面黏结性能退化有关。组合维修行为的可靠度始终维持在较高水平,主要是由于在不同的退化阶段,采用了最适宜的维修方法进行加固,从而实现了对结构性能最有效的长期维持。从可靠度角度印证了组合维修策略的技术优越性,它通过方法的多样性克服了单一方法在加固效果上的不足。

从图8可知:增大截面法产生的碳排放量最多,而粘贴FRP的碳排放量最小,但其维修的总费用最高;组合维修行为产生的碳排放量与粘贴钢板以及体外预应力法产生的碳排放量相当,但组合维修行为的维修费用更低;与增加截面以及粘贴FRP两种较为极端的维修方式相比,组合维修行为更加合理。因此,相较于单一维修行为,组合维修行为更有优势,其具体维修方式为:在第34年采用增大截面法,在第40、47、52、68、89、96年采用体外预应力法,在第62年采用粘贴钢板法,在第78年采用粘贴FRP法。

6 结论

从绿色低碳的角度出发,建立了桥梁维修过程中的碳排放计算模型,综合考虑碳排放、维修成本以及桥梁可靠度,构建了考虑碳排放的桥梁维修策略多目标优化模型。基于NSGA-II算法,以某桥为工程实例,得到了不同权重下的桥梁最优维护策略,并对比了单一维修行为与组合维修行为,主要结论如下:

(1) 根据安全、经济、低碳的目标,提出了桥梁可靠度、维修成本以及碳排放的计算方法,构建了综合考虑可靠度、成本和碳排放的目标函数,依托目标函数并结合桥梁的可靠度约束条件,形成了考虑碳排放的桥梁维修策略多目标优化模型。

(2) 决策者可根据不同需求选择桥梁维修策略,当偏重经济效益时,维护成本最低($3.409 6 \times 10^6$ 元),但可靠度指标需降至4.004 0,同时碳排放量升至 $3.083 4 \times 10^5$ kg;当偏重环境影响时,碳排放量可降至最低($2.813 3 \times 10^5$ kg),但其可靠度仅为3.951 9,且成本增至 $3.684 1 \times 10^6$ 元;当偏重整体性能时,可获得最高的可靠度(4.269 2),但碳排放及成本分别达到了 $3.493 9 \times 10^5$ kg与 $4.442 4 \times 10^6$ 元;在同等权重时,所得策略的各项指标(可靠度4.111 7,成本 $3.846 4 \times 10^6$ 元,碳排放 $3.233 5 \times 10^5$ kg)处于上述极端偏好之间的一个均衡区间,验证了其作为折中方案的合理性。

(3) 组合维修行为产生的碳排放量与粘贴钢板以及体外预应力法产生的碳排量相当,但组合维修行为的维修费用更小;增大截面法产生的碳排放量最多,而粘贴FRP法的碳排放量最小,但维修总费用最高。

参考文献:

References:

- [1] 朱坤, 颜鹏飞, 谭慧, 等. 基于全寿命周期与材料劣化的桥梁抗震可靠度研究[J]. 中外公路, 2025, 45(2): 133-140.
ZHU Kun, YAN Pengfei, TAN Hui, et al. Seismic reliability of bridge considering material deterioration during whole life cycle[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2025, 45(2): 133-140.
- [2] 彭建新, 柴莹, 张建仁. 桥梁结构服役状态可靠度评估综述[J]. 中外公路, 2023, 43(4): 1-7.
PENG Jianxin, CHAI Ying, ZHANG Jianren.

- Summarization of reliability theory for condition assessment of bridge structures[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(4): 1-7.
- [3] 刘曙光, 刘军, 刘咏华, 等. 基于LCA和LCC的桥梁全生命周期维护决策优化[J]. 中外公路, 2023, 43(4): 124-130.
LIU Shuguang, LIU Jun, LIU Yonghua, et al. Optimization of bridge life cycle maintenance decision based on LCA and LCC[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(4): 124-130.
- [4] THOFT-CHRISTENSEN P. Advanced bridge management systems[J]. Structural Engineering Review, 1995, 7(3): 151-163.
- [5] BARONE G, FRANGOPOL D M, SOLIMAN M. Optimization of life-cycle maintenance of deteriorating bridges with respect to expected annual system failure rate and expected cumulative cost[J]. Journal of Structural Engineering, 2014, 140(2): 04013043.
- [6] DONG Y, FRANGOPOL D M. Probabilistic time-dependent multihazard life-cycle assessment and resilience of bridges considering climate change[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2016, 30(5): 04016034.
- [7] KIM S, FRANGOPOL D M. Efficient multi-objective optimisation of probabilistic service life management[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2017, 13(1): 147-159.
- [8] SAFI M, SUNDQUIST H, KAROUMI R. Cost-efficient procurement of bridge infrastructures by incorporating life-cycle cost analysis with bridge management systems [J]. Journal of Bridge Engineering, 2015, 20(6): 04014083.
- [9] BIONDINI F, FRANGOPOL D M. Life-cycle performance of deteriorating structural systems under uncertainty: review[J]. Journal of Structural Engineering, 2016, 142(9): F4016001.
- [10] SHUBBAR A A, SADIQUE M, SHANBARA H K, et al. The development of a new low carbon binder for construction as an alternative to cement[C]// Singapore: Advances in Sustainable Construction Materials and Geotechnical Engineering, 2019.
- [11] 张振浩, 谭荣平, 方明. T梁桥在建设期碳排放模型的建立与分析[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2018, 15(3): 71-78.
ZHANG Zhenhao, TAN Rongping, FANG Ming. Establishment and analysis of carbon emissions model of T-beam bridge during construction[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2018, 15(3): 71-78.
- [12] KAEWUNRUEN S, SRESAKOOLCHAI J, ZHOU Z H, et al. Sustainability-based lifecycle management for bridge infrastructure using 6D BIM[J]. Sustainability, 2020, 12(6): 2436.
- [13] LEI X M, DONG Y, FRANGOPOL D M. Sustainable life-cycle maintenance policymaking for network-level

- deteriorating bridges with a convolutional autoencoder-structured reinforcement learning agent[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2023, 28(9): 04023063.
- [14] XU G W, GUO F D. Sustainability-oriented maintenance management of highway bridge networks based on Q-learning[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 81: 103855.
- [15] LIU Y S, PANG B, WANG Y F, et al. Life-cycle maintenance strategy of bridges considering reliability, environment, cost and failure probability CO₂ emission reduction: A bridge study with climate scenarios[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 379: 134740.
- [16] WU C K, WU P, WANG J, et al. Critical review of data-driven decision-making in bridge operation and maintenance[J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2022, 18(1): 47-70.
- [17] 江辉, 谷琼, 黄磊, 等. 考虑氯离子侵蚀时变劣化效应的近海斜拉桥地震易损性分析[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2021, 51(1): 38-45.
JIANG Hui, GU Qiong, HUANG Lei, et al. Analysis on seismic vulnerability of offshore cable-stayed bridge considering time-dependent deterioration by chloride-induced corrosion[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2021, 51(1): 38-45.
- [18] 吴庆, 袁迎曙. 锈蚀钢筋力学性能退化规律试验研究[J]. *土木工程学报*, 2008, 41(12): 42-47.
WU Qing, YUAN Yingshu. Experimental study on the deterioration of mechanical properties of corroded steel bars[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2008, 41(12): 42-47.
- [19] 石云, 李松辉, 杨柳. 在役桥梁构件承载能力安全性实用分级标准研究[J]. *公路交通科技*, 2013, 30(12): 69-79.
SHI Yun, LI Songhui, YANG Liu. Study on practical grading standard of security of bearing capacity of existing bridge members[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2013, 30(12): 69-79.
- [20] 王力, 潘启仁, 周晓夫, 等. 基于F-J-M法的桥梁温度与地震作用效应组合研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2024, 44(2): 273-282.
WANG Li, PAN Qiren, ZHOU Xiaofu, et al. Study on combined effects of bridge temperature and seismic actions based on F-J-M method[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2024, 44(2): 273-282.
- [21] 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, 42(1): 83-88.
ZHAO Shangchuan, ZHAO Guofan, GONG Jinxin. Optimum prediction of remaining service life of existing concrete structures[J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2002, 42(1): 83-88.
- [22] LABROSSE A. Progress towards sustainable road construction: An investigation into the roads and maritime services of new south wales and sustainability rating tools [D]. Toowoomba: University of Southern Queensland, 2015.
- [23] 俞海勇, 王琼, 张贺, 等. 基于全寿命周期的预拌混凝土碳排放计算模型研究[J]. *粉煤灰*, 2011, 23(6): 42-46.
YU Haiyong, WANG Qiong, ZHANG He, et al. Study on carbon emission calculation model of ready-mixed concrete based on life cycle[J]. *Coal Ash*, 2011, 23(6): 42-46.
- [24] 徐双. 不同结构材料的桥梁生命周期碳排放研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
XU Shuang. The research on carbon emissions of different structural materials in bridge life cycle[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012.
- [25] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA- II [J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, 6(2): 182-197.
- [26] 崔鹏. 建筑物生命周期碳排放因子库构建及应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.
CUI Peng. The establishment of a life-cycle carbon emission factor database for buildings and research[D]. Nanjing: Southeast University, 2015.
- [27] 王磊, 陈瑞, 戴理朝, 等. 面向低碳理念的桥梁群多目标维护决策优化研究[J]. *中国公路学报*, 2024, 37(4): 188-200.
WANG Lei, CHEN Rui, DAI Lizhao, et al. Multi-objective maintenance optimization strategy for bridge networks oriented to low-carbon[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2024, 37(4): 188-200.