

基于改进 NSGA-II 算法的桥梁维护策略优化研究

杨志明

(广东交科检测有限公司, 广东 广州 510440)

摘要: 针对钢筋混凝土桥梁在运营周期内的检测维护策略优化问题, 提出了一种改进的非支配排序遗传算法 (NSGA-II) 进行桥梁维护策略优化分析, 克服原有算法的缺陷, 提高其在桥梁检测与维护策略优化中的应用效能。以桥梁可靠度指标、检测维护成本为优化目标, 建立桥梁检测维护策略优化模型, 依托国内某钢筋混凝土桥梁, 求解得到了最优维护策略方案。结果表明: 实质性检测维护可以提高桥梁结构的可靠度指标, 使其安全性能得到保障; 预防性检测维护可显著降低桥梁可靠性能退化速率, 减少维护成本, 但检测维护次数会明显增加。

关键词: 钢筋混凝土桥梁; 检测维护策略; 改进 NSGA-II 算法; 可靠度; 维护成本

中图分类号: U445.7

文献标识码: A

Research on Optimization of Bridge Maintenance Strategy Based on NSGA-II Algorithm

YANG Zhiming

(Guangdong Jiaoke Testing Co., Ltd., Guangzhou 510440, Guangdong, China)

Abstract: This paper proposes an improved non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II) for optimizing the inspection and maintenance strategy of reinforced concrete bridges during their operational cycle. The algorithm overcomes the shortcomings of the original algorithm and improves its application efficiency in bridge inspection and maintenance strategy optimization. A bridge inspection and maintenance strategy optimization model was established with bridge reliability indicators and inspection and maintenance costs as the optimization objectives. Based on a reinforced concrete bridge in China, the optimal maintenance strategy scheme was solved. The results indicate that substantive inspection and maintenance can improve the reliability index of bridge structures, ensuring their safety performance. Moreover, preventive testing and maintenance can significantly reduce the rate of reliability degradation of bridges and reduce maintenance costs, but the frequency of testing and maintenance will increase significantly.

Key words: reinforced concrete bridge; testing and maintenance strategy; improved NSGA-II algorithm; reliability; maintenance cost

随着我国基础设施的迅速扩张, 桥梁工程技术飞速发展, 桥梁作为关键的交通纽带, 其安全性和可靠性受到了前所未有的关注。桥梁结构的健康监测与维护管理不仅是确保交通运输顺畅的重要环节, 也是公共安全的关键保障。然而, 桥梁检测与维护工作面临着资源有限、成本高昂以及决策复杂等挑战, 特别是在多目标决策环境

中, 如何在延长桥梁使用寿命、控制维护成本与确保公众安全之间找到最佳平衡点, 成为一个亟待解决的问题。周浩等^[1]提出了一种考虑钢筋锈蚀影响导致的桥梁结构损伤下维护策略优化方法, 以维护后的桥梁使用寿命与成本为目标函数建立优化模型, 计算得到了最优维护方案。Fereydoon 等^[2]以最小化全寿命周期和用户成本

收稿日期: 2024-09-10

作者简介: 杨志明, 工程师, 本科, 主要从事桥梁检测工作

以及最大化桥梁网络的可靠性为目标函数,开发了一种多目标粒子群优化算法进行求解,以某大桥为算例得到了最优检测维护方案。Chen等^[3]考虑桥梁部件劣化的量化影响,提出了一个基于系统可靠性原理制定桥梁维护优化策略的创新模型,旨在提高以桥梁为主导的路网的整体可靠性。以某桥梁为主导的路网作为算例,结果表明,该模型能够量化不同的桥梁维护策略对整个路网的影响,可为决策者设计有效、高效的维护策略以延长桥梁主导路网的寿命。马亚飞等^[4]研究了气候变化对桥梁检测维护策略优化的影响,提出了一种具有气候适应性的维护策略优化方法,并通过算例验证了该方法的可行性。

近年来,智能优化算法在解决复杂的多目标桥梁维护决策问题中展现出了巨大潜力^[5-7]。因此,本文提出一种改进的NSGA-II算法进行桥梁维护策略优化分析,克服原有算法的缺陷,提高其在桥梁检测与维护策略优化中的应用效能。以桥梁可靠度指标、检测维护成本为优化目标,建立桥梁检测维护策略优化模型,依托国内某钢筋混凝土桥梁,求解得到了最优维护策略方案,可为实际工程中桥梁检测维护策略分析提供参考。

1 钢筋混凝土桥梁时变可靠度分析

1.1 桥梁结构抗力概率模型

钢筋混凝土桥梁在运营过程中受到各种不确定性外界因素的影响,会造成其结构承载力随着时间的推移而发生退化,从而导致桥梁结构的可靠度降低。为得到钢筋混凝土桥梁在各种不确定性参数影响下的抗力衰减模型,采用文献^[8]中的方法,模型表达式如式(1)所示:

$$R(t) = K_p k_b R_p(t) = K_p k_b R[f_{ci}(t), a_i] \quad (1)$$

式中, K_p 为影响钢筋混凝土桥梁抗力的不确定性参数; K_b 为粘结性能退化系数,根据钢筋锈蚀裂缝宽度选取^[9]; $R[\cdot]$ 表示桥梁结构抗力函数; f_{ci} 表示桥梁材料性能参数; a_i 表示桥梁结构几何参数。

在对桥梁结构构件承载力进行计算时,假设其抗力服从正态分布,根据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)可得到单筋矩形截面梁的抗力表达式:

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

式中, $f_s(t)$ 表示钢筋时变屈服强度; $f_c(t)$

表示混凝土时变抗压强度; $A_s(t)$ 表示钢筋截面面积; b 表示构件截面宽度; h_0 表示构件截面有效高度。

钢筋锈蚀是影响桥梁结构抗力的重要因素,为准确描述钢筋锈蚀的影响,本文采用基于概率的桥梁损伤表示桥梁结构损伤程度,其表达式如下:

$$\delta = \frac{p(t)}{D_0} \quad (3)$$

式中, δ 表示桥梁结构损伤强度; $p(t)$ 表示 t 时刻对桥梁结构进行检测时钢筋局部锈蚀深度; D_0 为钢筋的原始直径。

1.2 桥梁结构效应概率模型

桥梁结构荷载效应模型是进行结构可靠性分析的关键,作用于桥梁结构的主要荷载有永久荷载与车辆荷载。根据《公路工程结构可靠度设计统一标准》,桥梁结构的永久荷载 G 服从正态分布,概率分布函数如下:

$$F_G(x) = \frac{1}{0.0437 \sqrt{2\pi} G_k} \times \int_{-\infty}^x \exp \left[-\frac{(x - 1.0148 G_k)^2}{0.0038 G_k^2} \right] dx \quad (4)$$

杨伟军^[10]通过对上式进行修正,推导得到桥梁结构在运营过程中永久荷载的均值与标准差的表达式如下:

$$\begin{aligned} \mu_{SG} &= 1.0148 r_u r_d G_k \\ \sigma_{SG} &= 0.0437 r_u r_d G_k \end{aligned} \quad (5)$$

式中, μ_{SG} 与 σ_{SG} 分别表示永久荷载的均值与标准差; r_u 与 r_d 分别表示考虑桥梁运营过程中维修与荷载变化对永久荷载标准值 G_k 的影响系数。

桥梁结构承受的活荷载主要为车辆荷载,而车辆荷载的大小在运营期间是随时间变化的,通常可使用随机过程概率模型来描述车辆荷载的时变规律,其概率模型表达式如下:

$$S_Q = k_{SQK} K_{SQ} S_{QK} \quad (6)$$

式中, S_Q 与 S_{QK} 分别表示作用于桥梁上的车辆荷载效应与车辆荷载效应标准值; k_{SQK} 表示修正系数; K_{SQ} 表示车辆荷载实际值与标准值之比。

由文献^[11]得到车辆荷载效应均值与标准差表达式如下:

$$\begin{aligned} \mu_{SQT_0} &= \mu_{SQT} + \ln(T_0/T)/a \\ \sigma_{SQT_0} &= \sigma_{SQT} \\ a &= \pi / \sqrt{6} \sigma_{SQT} \end{aligned} \quad (7)$$

式中, T 与 T_0 表示桥梁设计使用年限与剩余

设计使用年限； $\mu_{s_{QT}}$ 与 $\sigma_{s_{QT}}$ 表示桥梁已使用年限内车辆荷载效应的均值与标准值。

1.3 桥梁结构可靠度评估

桥梁随着运营年限的增加会出现结构承载力退化的现象，如果不进行桥梁检测维护，其损伤指标强度将随运营年限的增加不断增加，桥梁结构时变可靠指标将随运营年限的增加不断降低。通过上述桥梁结构的抗力与效应概率模型，可将桥梁结构在运营时间 t 的可靠度模型表示如下：

$$Z(t) = g[R(t), S_G, S_Q(t)] = R(t) - S_G - S_Q(t) \quad (8)$$

式中， $Z(t)$ 表示桥梁结构功能函数； $R(t)$ 表示结构抗力函数； S_G 表示桥梁结构永久荷载效应函数； $S_Q(t)$ 表示桥梁结构车辆荷载效应函数。

桥梁结构的失效概率如下：

$$P_f(t) = P[Z(t) \leq 0] = P[R(t) - S_G - S_Q(t) \leq 0] \quad (9)$$

式中，车辆荷载效应服从极值 I 型分布。

在实际工程中，通常选择使用可靠度指标 β 表示桥梁结构可靠性，表达式如下：

$$\beta(t) = \varphi^{-1}[P_f(t)] \quad (10)$$

为准确描述桥梁在运营期间可靠度指标的退化情况，采用桥梁非线性劣化指数模型描述桥梁的可靠度劣化情况，模型描述如下：

$$\beta = \begin{cases} \beta_0, & 0 \leq t \leq t_0 \\ \beta_0[2 - e^{\alpha(t-t_0)}], & t > t_0 \end{cases} \quad (11)$$

式中， β_0 表示桥梁结构初始可靠度； α 表示劣化率； t 表示时间变量； t_0 为桥梁结构性能退化开始时间。

2 桥梁维护决策优化

2.1 维护决策优化模型

为保证桥梁结构在运营期间的安全性能，避免发生结构安全事故，需要对桥梁进行定期检测维护。为确定桥梁检测维护的最优策略，本文以可靠度指标和检测维护成本为优化目标进行维护策略优化研究。桥梁结构的安全性能与检测维护成本均会随检测维护频率的增加而提高，故需要确定一个合理的桥梁结构检测维护策略，在保障桥梁安全使用的前提下使得检测维护成本最低。桥梁结构检测维护总成本可由式 (12) 表示^[13]：

$$C_{all} = C_d + C_i \quad (12)$$

式中， C_{all} 表示对桥梁结构运营周期内进行检

测维护所产生的总成本； C_d 表示桥梁检测维护的直接成本，通常包括具体桥梁检测或维护活动所产生的费用，如人工、材料、机械设备等费用； C_i 表示间接成本，通常包括与桥梁检测和维护相关的，但不能直接归因于具体任务的费用，这些成本可能更难以量化，但对总成本的影响同样重要，如管理费、折旧费等。而在桥梁运营过程中，时间 t 同样会对检测维护成本产生影响，因此在进行成本计算时需要考虑时间对维护成本进行折现，其表达式如下：

$$C_0 = \frac{C_{all}}{1 + r} \quad (13)$$

式中， r 表示折现率，取 4%。

通过上述分析，构建桥梁检测维护策略的优化模型如下：

$$\begin{cases} \max \beta(t) \\ \min C_0(t) \end{cases} \quad (14)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} \beta(t) \geq \beta_{\text{target}} \\ \delta(t) \leq \delta_{\text{thres}} \end{cases}$$

式中， β_{target} 为桥梁可靠度指标最低限值； δ_{thres} 为桥梁损伤强度指标阈值。

2.2 改进 NSGA-II 算法求解

NSGA-II 是一种用于解决多目标优化问题的遗传算法，通过引入一种快速的非支配排序方法与精英策略降低了算法的计算复杂度。本文采用改进 NSGA-II 算法对桥梁维护策略进行优化，通过对 NSGA-II 算法的拥挤度公式、精英保留策略以及编码、交叉与变异步骤进行优化，优化过程如下：

(1) 拥挤度。支配性可以反映求解问题边界解集的分布多样性，为了让一些子目标维度上离散拥挤距离较大的种群个体获得更多的遗传机会，维持层内分布性，改进 NSGA-II 算法的拥挤度计算公式如下：

$$d_i = \frac{\sqrt{\sum_{m=1}^M \left(\frac{f_m^{i-1} - f_m^{i+1}}{f_m^{\max} - f_m^{\min}} \right)^2}}{M}; m = 1, 2, \dots, M \quad (15)$$

式中， d_i 为拥挤度距离； f_m^i 为个体 i 的第 m 个目标函数； $f_m^{\max}$ ， $f_m^{\min}$ 分别为个体 i 的第 m 个目标函数的最大值与最小值。

(2) 精英保留策略。在进化的初期，种群的个体需要保证 Pareto 解集的多样性，并且必须固

定精英保留大小。然而,在进化的后期,优化算法需要加强局部搜索的能力并且增加精英留存的规模,以保证更好的收敛性。整个进化过程还需要保留非支配排序等级为1的个体,以避免精英个体的流失。本文引入群体适应性精英保留策略对NSGA-II算法进行改进,第 k 代人群的精英保留量表如公式(16)所示:

$$F_{limk} = N \times \alpha_k \quad (16)$$

式中, α_k 为第 k 代精英保留大小的影响因子; N 为种群规模。 α_k 的自适应迭代方程如式(17)所示:

$$\alpha_k = \alpha_{\min} + (\alpha_{\max} - \alpha_{\min}) \left(\frac{NDnum}{N} \right)^2 \quad (17)$$

式中, $\alpha_{\max}$ 与 $\alpha_{\min}$ 分别为集合最大与最小精英保留大小的影响因子; $NDnum$ 为后代非支配排序等级为1的个体数目。

(3) 染色体编码、交叉与变异。改进NSGA-II算法采用Gray编码进行编码,假设 $B = b_m b_{m-1} \cdots b_1$ 为二进制代码, $G = g_m g_{m-1} \cdots g_1$ 为相应的Gray代码,两者之间的相互关系如式(18)所示:

$$\begin{cases} g_m = b_m \\ g_i = b_{i+1} \oplus b_i, i = m-1, m-2, \dots, 1 \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{cases} b_m = g_m \\ b_i = g_{i+1} \oplus g_i, i = m-1, m-2, \dots, 1 \end{cases}$$

改进NSGA-II算法中的染色体交叉操作为单点交叉,通过在染色体的任何一个基因序列上选择一个交叉点,将这两对染色体在基因序列上进行交叉转化,改变原始染色体结构,从而产生两个新的个体。在算法遗传过程中通过多点变异,随机生成几个大小在0和代码长度之间的整数,将相应位置上的个体从1改为0或者从0改为1。

基于改进NSGA-II算法对式(13)桥梁检测维护策略的优化模型进行求解,求解流程如图1所示,步骤如下:①产生初始种群,得到桥梁维护策略优化模型的亲代种群;②根据桥梁检测维护策略优化模型式(14),计算目标函数值;③组合亲代和子代种群进行快速非支配排序,计算各非支配层个体的拥挤度;④通过非支配关系和个体拥挤度选取合适的个体形成新的亲代种群,保留精英个体;⑤根据新亲代种群的个体,利用遗传算子获得新的子代种群;⑥判断是否达到最大迭代次数,若达到,则输出最优维护策略前沿解集,若未达到,则返回步骤③。

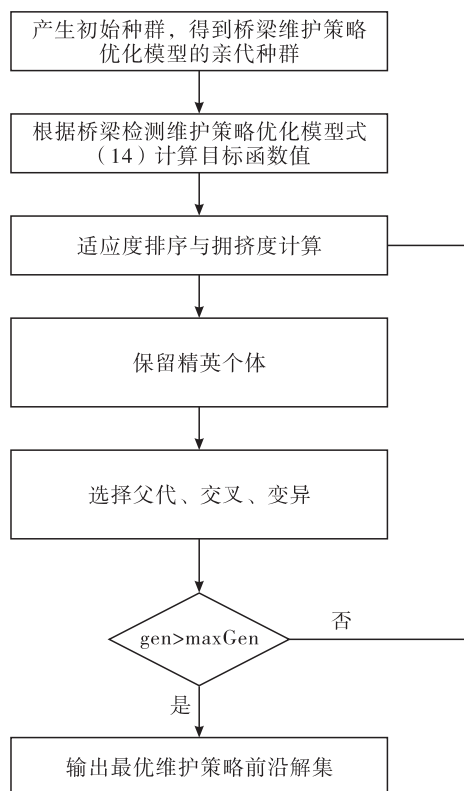


图1 改进NSGA-II算法求解流程

3 工程实例

3.1 工程概况

以国内某钢筋混凝土桥梁为工程背景,该桥上部结构主梁采用为预应力连续T形梁 2×30 m,下部构造为柱式墩、肋式台配桩基础,桥宽为12.25 m,设计荷载等级为公路-I级,桥梁普通钢筋采用HRB335带肋钢筋,预应力筋采用钢绞线,桥梁横断面如图2所示。对该桥梁在运营过程中的检测维护考虑两种方案,第一种方案是当桥梁在运营过程中,随着时间的推移,结构钢筋出现锈蚀导致损伤强度指标超过限值,或是结构构件可靠度指标低于规范限值时,便开始对桥梁结构进行实质性检测维护(EM),使其损伤强度或者是可靠度满足规范要求;第二种方案是桥梁在运营过程中每隔一段时间便对桥梁结构进行预防性检测维护(PM),预防桥梁可能出现损伤或可靠度低于限值的现象。

3.2 结果分析

采用MATLAB软件对基于改进NSGA-II算法的桥梁维护策略的优化模型进行编程求解,维护周期为50年,种群大小为100,最大进化代数为300,各参数取值见表1。图3给出了改进NSGA-II算法的维护决策优化结果。由图可知,种

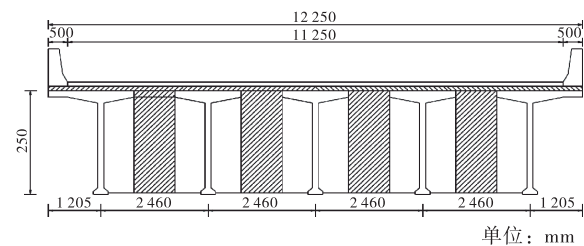


图2 桥梁断面图

群在 300 代以后最优解集分布较为规律，在桥梁运营期限 50 年内，桥梁结构可靠度指标与检测维护费用之间基本呈现正相关，维护费用成本越高，桥梁的可靠度指标越大。

表 2 为最优解集上的两种不同维护方案，对比表 2 与图 3 中两种最优维护方案的可靠性概率与维护费用可知，方案 1 在桥梁运营期 50 年内采

表 1 参数取值

维护周期/ <i>t</i>	种群大小	最大进化代数	精英数目	后代交叉比例	变异概率	桥梁结构初始可靠度	劣化率	桥梁结构性能退化开始时间/ <i>t</i> ₀
50	100	300	500	0.75	0.01	5.49	0.13/年	10

取 2 次预防性维护与 1 次实质性维护，首次预防性维护时间为第 14 年，实质性维护时间为第 38 年，维护成本为 245 万元。方案 2 在桥梁运营期 50 年采取 5 次预防性维护，不作实质性维护，首次预防性维护为第 12 年，维护成本为 215 万元。

方案 2 比方案 1 对桥梁进行更早的预防检测维护，并且维护周期缩短，维护次数增加，减少了维护成本。但方案 2 与方案 1 相比没有进行实质性维护，在桥梁运营周期内，桥梁的整体可靠性概率有所降低。

表 2 不同维护方案对比

维护方案	可靠性概率/%	维护费用/万元	预防性维护次数	首次预防性维护时间/年	实质性维护次数	实质性维护时间/年
方案 1	98.17	245	2	14	1	38
方案 2	97.21	215	5	12	0	-

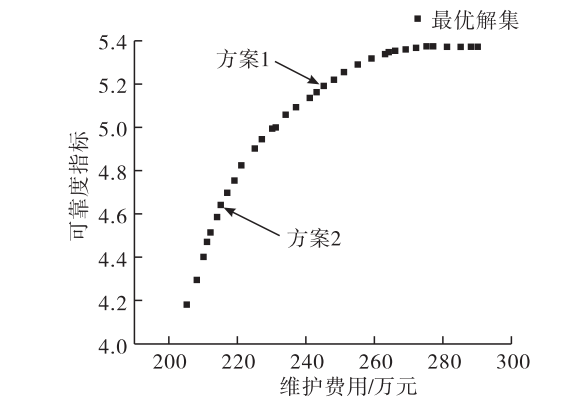


图3 检测维护优化结果

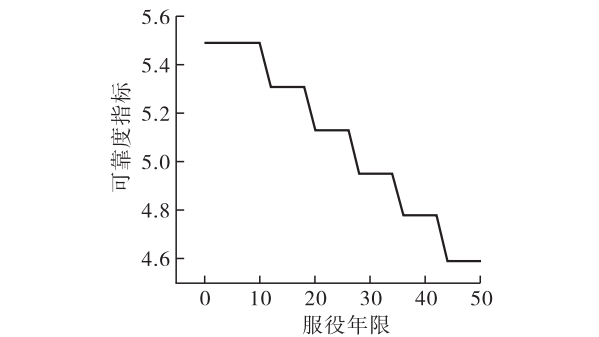


图5 维护方案 2 桥梁结构可靠度指标变化曲线

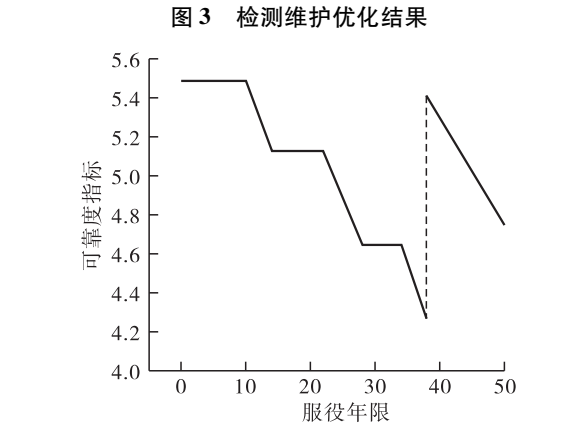


图4 维护方案 1 桥梁结构可靠度指标变化曲线

为了全面清晰地了解钢筋混凝土桥梁在方案 1 与方案 2 维护策略下，运营周期内桥梁结构的

可靠性能，图 4、图 5 给出了两种方案下桥梁结构在服役年限为 50 年的可靠度指标变化曲线。由图可知，方案 1 策略下桥梁结构可靠度指标下降速率明显快于方案 2，但方案 1 在桥梁服役年限为 38 年，可靠度指标下降至 4.27 时进行了一次实质性维护，将可靠度指标值提升至 5.41，后续不做任何检测维护；服役年限为 50 年时，桥梁可靠度指标值降至 4.75。方案 2 策略下桥梁结构可靠度指标下降较为缓慢，由于预防性维护次数的增加，缩短了检测维护周期，使得其结构可靠度指标从 5.49 较为平缓的降至服役年限 50 年的 4.59。实质性检测维护可以提高桥梁结构的可靠度指标，使其安全性能得到保障，而预防性检
(下转第 27 页)

- [4]李秉宜,宣剑裕,郑文斌,等.改良高液限粘土水稳定性试验研究[J].四川大学学报(工程科学版),2016,48(4):64-69.
- [5]杨和平,李宏泉.石灰改良处治高液限土的路用特性试验研究[J].公路工程,2013,38(4):227-229,268.
- [6]甘先永.“康奈”土壤稳定剂处治高液限土施工工艺[J].中外公路,2005(4):171-173.
- [7]李成龙.掺隧道洞渣改良高液限土路用特性研究[D].西安:西安建筑科技大学,2020.
- [8]中华人民共和国建设部.土的工程分类标准:GB/T 50145—2007[S],北京:人民交通出版社,2007.
- [9]刘鑫,洪宝宇.高液限土工程特性与路堤填筑方案[J].河海大学学报,2011(4):436-443.

(上接第17页)

测维护可以明显地降低桥梁可靠性能退化速率,但检测维护次数会明显增加。

4 结论

本文针对钢筋混凝土桥梁在运营周期内的检测维护策略优化问题进行研究,提出了一种改进的NSGA-II算法进行桥梁维护策略优化分析,克服原有算法的缺陷,提高其在桥梁检测与维护策略优化中的应用效能。以桥梁可靠度指标、检测维护成本为优化目标,建立桥梁检测维护策略优化模型,依托国内某钢筋混凝土桥梁,求解得到了最优维护策略方案,主要结论如下:①基于改进NSGA-II算法对桥梁检测维护策略优化问题进行求解,结果表明算法在300代以后最优解集分布较为规律,桥梁结构可靠度指标与检测维护费用之间基本呈现正相关,维护费用成本越高,桥梁的可靠度指标越大。②在桥梁运营周期内实施实质性检测维护可以较为明显地提高桥梁结构的可靠度指标,使其安全性能得到保障,但同时维护成本也会增加。③在桥梁运营周期内只进行预防检测维护,会使维护周期缩短,维护次数增加,维护成本减少,且预防性检测维护可以明显降低桥梁可靠性能退化速率,但在桥梁运营周期内,桥梁的整体可靠性概率有所降低。

参考文献:

- [1]周浩,黄天立,任伟新,等.基于概率的锈蚀钢筋混凝土桥梁检测维护策略优化[J].中南大学学报(自然科学

版),2014,45(12):4292-4299.

- [2]FEREYDOON S, DASHTI H N, JAVAD M A T. Developing a fuzzy bi-objective programming and MCDM model for bridge maintenance strategy optimization[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 13336-13356.
- [3]SHILUN C, DA C, LE L, et al. Optimized Bridge Maintenance Strategies: A System Reliability - Based Approach to Enhancing Road Network Performance[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2024, 150(3): 1-12.
- [4]马亚飞,彭叶辉,彭安银,等.气候变化背景下桥梁全生命周期可持续维护策略优化[J/OL]. 工程力学, 1-12 [2024-07-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2595.O3.20240221.1657.014.html>.
- [5]戴丹斌.基于蚁群算法的桥梁维护策略优化[J].湖南交通科技,2022,48(3):114-118.
- [6]彭建新,邵旭东,张建仁.基于粒子群算法的劣化桥面铺装多目标组合维护策略优化研究[J].工程力学, 2011, 28(2): 205-211.
- [7]程健,黎恩华.基于粒子群算法的桥梁多目标维护决策优化[J].工程与建设,2020,34(4):767-769.
- [8]李扬海,鲍卫刚,郭修武.公路桥梁结构可靠度与概率极限状态设计[M].北京:人民交通出版社,1997.
- [9]全明研.老化和损伤的钢筋混凝土构件的性能[J].工业建筑,1990,4(2):15-19.
- [10]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,2002,27(3):31-33.
- [11]陈冠.考虑冲刷作用的桥梁网络维护决策优化[J].湖南交通科技,2022,48(3):108-113.