

DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2024.04.027

引用格式: 张国冬, 赵威, 戴理朝. 考虑交通量增长的在役桥梁维修策略分析 [J]. 公路与汽运, 2024, 40(4): 124-131.

Citation: ZHANG Guodong, ZHAO Wei, DAI Lizhao. Analysis on maintenance strategy of in-service bridges considering traffic growth [J]. Highways & Automotive Applications, 2024, 40(4): 124-131.

考虑交通量增长的在役桥梁维修策略分析*

张国冬¹, 赵威², 戴理朝¹

(1. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 中国电建集团 中南勘察设计研究院有限公司, 湖南 长沙 410014)

摘要: 为探究交通量增长对桥梁维修策略的影响, 构建考虑交通量增长的多目标维修策略优化决策模型。先结合钢筋混凝土结构劣化已有研究成果, 利用蒙特卡罗抽样得到结构抗力退化时变模型, 分析规范车辆荷载作用下桥梁时变可靠度; 再用可靠度指标表征桥梁性能状态, 构建以桥梁失效概率和维修成本为优化目标的优化模型, 采用非支配排序遗传算法(NSGA-II)进行优化计算, 利用理想点决策法得到最优维修策略; 最后以某在役桥梁为例进行分析, 验证模型的有效性和优越性。结果表明, 车辆荷载的非平稳增长会明显降低桥梁可靠度指标; 交通量增长会导致桥梁失效概率上升、维修成本增加; 交通量越大的区域桥梁, 交通量增长对维修策略的影响越显著。

关键词: 桥梁; 维修策略; 交通量; 主梁时变可靠度; 非支配排序遗传算法(NSGA-II)

中图分类号: U445.7

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2024)04-0124-08

钢筋混凝土桥梁服役期间, 氯离子侵蚀、混凝土碳化及材料老化会导致钢筋混凝土结构抗力不断衰减。早期建设的公路桥梁设计荷载标准低, 随着公路桥梁交通量的日益增长, 桥梁长期处于超载运营状态, 进一步加速了结构承载能力的退化。为确保在役桥梁的健康运营, 桥梁管理部门不断加强桥梁检测和维修, 加剧了维修需求和维修资金之间的不平衡。因此, 制定同时考虑结构抗力劣化和交通量增长的维修策略势在必行。

国内外学者针对劣化桥梁构件维修策略优化开展了广泛研究。Frangopol D. M. 等提出了一种用于规划劣化结构日常检测与维修活动的全寿命周期成本优化方法, 该方法可以在满足结构可靠度约束的同时, 使预期全寿命周期成本最小^[1]。Enright M. P. 等使用自适应重要性抽样与数值积分相结合的方法进行锈蚀钢筋混凝土桥梁时变可靠度指标计算, 并以此作为结构性能指标, 分析规定可靠度约束下最小预期维修成本, 确定最优检修策略^[2]。Kong J. S. 等针对劣化桥梁结构, 提出基于时变可靠度的维修策略, 根据叠加原理, 考虑不同维修活动对可靠度指标的影响, 进行全寿命周期成本效益分析^[3]。

随着计算机技术的进步及智能算法的发展, 多目标优化算法在桥梁维修领域得到广泛应用。彭建新等针对劣化的桥面铺装, 采用多目标粒子群算法进行组合维修策略优化, 得到了同时满足维修经济效益和结构性能要求的最优维修策略^[4]。周浩等用钢筋局部锈蚀深度表征结构性能指标, 以检测维护成本最小、使用寿命最大为优化目标, 基于蒙特卡罗模拟与遗传算法得到了检测维护策略的帕累托(Pareto)解决方案^[5]。Xie H. B. 等用受力最不利的边主梁代表整个主梁体系, 以最大结构安全性、最小全寿命周期成本和最小环境影响为优化目标, 通过遗传算法寻找到了最优的预防性维修初始时间和时间间隔^[6]。Liu Z. X. 等结合随机车流模拟和有限元模型量化角撑板连接处的时变疲劳可靠度指标, 使用自适应粒子群算法对单一维修策略与组合维修策略进行全寿命周期成本优化, 获得了角撑板连接处的最佳维护策略^[7]。Han X. 等利用非支配排序遗传算法(NSGA-II), 分析了多梁桥不同主梁间抗力相关性对桥梁最优全寿命周期维护策略的影响^[8]。以上桥梁维修策略研究仅考虑桥梁服役期间抗力水平的退化, 以正常使用极限状态下可靠度指标作为决

* 基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB2600900); 国家自然科学基金资助项目(52278140; 52008035); 湖南省自然科学基金资助项目(2020JJ1006; 2021JJ40574)

策依据,忽略了交通量增长带来的结构承载力下降,导致结构性能评估结果偏于保守,造成维修决策错误。鉴于此,本文以钢筋混凝土主梁为研究对象,综合考虑钢筋强度、截面面积、黏结强度及混凝土强度退化,建立多因素影响下主梁抗力退化时变模型,通过调整规范车辆荷载中密集行车占比模拟交通量变化,得到不同交通状况下主梁时变可靠度;通过分析预防性维修活动、必要性维修活动对结构抗力水平和维修成本的影响,构建考虑交通量增长的多目标维修策略优化决策模型;采用 NSGA-II 优化算法进行全局寻优,得到预防性维修首次维修和维修周期的最优 Pareto 解集,使用理想点决策法对 Pareto 解集进行排序,获得不同交通状况下最佳维修策略,为桥梁管理提供更合理的维修策略。

1 基于可靠度指标的主梁性能评估

1.1 主梁抗力劣化时变统计参数

1.1.1 混凝土强度退化模型

根据结构混凝土强度随时间先增后减的变化规律,国内外学者对一般大气环境下混凝土长期暴露时性能变化进行了大量研究。姜超等通过回归分析得到 t 时刻混凝土强度均值 $\mu_{fc}(t)$ 与标准差 $\sigma_{fc}(t)$ 分别为^[9]:

$$\mu_{fc}(t) = 1.452 \cdot 9 \mu_{KM} f_{cd} \cdot \exp[-0.024 \cdot 6 (\ln t - 1.715 \cdot 4)^2] \quad (1)$$

$$\sigma_{fc}(t) = \sigma_{KM} f_{cd} (0.030 \cdot 5 t + 1.236 \cdot 8) \quad (2)$$

式中: μ_{KM} 、 σ_{KM} 分别为混凝土材料不确定性的均值和标准差; f_{cd} 为混凝土轴心抗压强度设计值。

1.1.2 钢筋强度退化模型

钢筋混凝土结构使用过程中,保护层的碳化及空气中水分、氯离子的侵入会造成钢筋锈蚀,使其力学性能退化,导致结构承载力降低,影响桥梁使用安全。已有研究给出的钢筋锈蚀开始时间 t_i 为:

$$t_i = \left(\frac{c - x_0}{k} \right)^2 \quad (3)$$

式中: c 为混凝土保护层厚度; x_0 为碳化残量,按式(4)计算; k 为混凝土碳化系数, $k = k_1 k_2 k_3 (24.48 / f_{ck}^{0.5} - 2.74)$; k_1 、 k_2 、 k_3 的取值见文献[10]。

$$x_0 = 4.86 (-R_H^2 + 1.5 R_H - 0.45) \cdot (c - 5) (\ln f_{ck} - 2.30) \quad (4)$$

式中: R_H 为环境湿度; f_{ck} 为混凝土轴心抗压强度标准值。

现有研究依据混凝土锈胀开裂时刻将钢筋锈蚀

分为混凝土锈胀开裂前和混凝土锈胀开裂后两个阶段。混凝土锈胀开裂前钢筋锈蚀深度 δ_1 与锈蚀速率 λ_1 分别为:

$$\delta_1 = \lambda_1 (t - t_i) \quad (5)$$

$$\lambda_1 = 46 k_{cr} k_{ce} e^{0.04 T} (R_H - 0.45)^{2/3} c^{-1.36} f_{cu}^{-1.83} \quad (6)$$

式中: k_{cr} 为钢筋位置修正系数,角部钢筋取 1.6,中部钢筋取 1.0; k_{ce} 为构件所处环境修正系数,室外潮湿环境取 3.0~4.0,室外干燥环境取 2.5~3.5; T 为环境温度; f_{cu} 为混凝土立方体抗压强度。

混凝土保护层胀裂时间 t_{cr} 与胀裂时对应的锈蚀深度 δ_{cr} 为:

$$t_{cr} = \frac{\delta_{cr}}{\lambda_1} + t_i \quad (7)$$

$$\delta_{cr} = k_{crs} \left(0.008 \frac{c}{d} + 0.000 \cdot 55 f_{cu} + 0.022 \right) \quad (8)$$

式中: k_{crs} 为钢筋位置影响系数,角部钢筋取 1.00,非角部钢筋取 1.35; d 为钢筋直径。

一旦钢筋锈胀力导致混凝土胀裂,混凝土对钢筋的保护作用将大大削弱,二氧化碳、氯离子等有害物质更易与钢筋接触,导致钢筋锈蚀速率加快^[11]。混凝土开裂后钢筋锈蚀深度 δ_2 为:

$$\delta_2(t) = \begin{cases} \delta_{cr} + 2.5 \lambda_1 (t - t_{cr}), & \lambda_1 > 0.008 \\ \delta_{cr} + (4 \lambda_1 - 187.5 \lambda_1^2) (t - t_{cr}), & \lambda_1 \leq 0.008 \end{cases} \quad (9)$$

对于直径较大的钢筋,均匀锈蚀对性能的影响较显著。本文考虑钢筋锈蚀为均匀锈蚀,钢筋截面剩余面积 A 与锈蚀深度的关系为:

$$A(t) = \begin{cases} \frac{n \pi d^2}{4}, & t \leq t_i \\ \frac{n \pi}{4} (d - 2 \delta_1)^2, & t_i < t < t_{cr} \\ \frac{n \pi}{4} (d - 2 \delta_2)^2, & t \geq t_{cr} \end{cases} \quad (10)$$

式中: n 为受力钢筋数量。

锈蚀率 η_s 与钢筋截面剩余面积的关系为:

$$\eta_s = 1 - \frac{A(t)}{A_0} \quad (11)$$

式中: A_0 为初始钢筋截面面积。

一般大气环境下钢筋屈服强度 f_y 与钢筋锈蚀程度的关系为^[12]:

$$f_y = f_{y0} \frac{0.985 - 1.028 \eta_s}{1 - \eta_s} \quad (12)$$

式中: f_{y0} 为钢筋未锈蚀前的屈服强度。

1.1.3 钢筋与混凝土黏结性能退化模型

钢筋与混凝土间良好的黏结性能是两种不同材料共同工作的关键。为体现黏结性能退化对结构承载力的影响,引入协同工作系数 k 反映锈蚀钢筋与混凝土之间黏结性能的退化,公式如下:

$$k(t) = \begin{cases} 1, \delta(t) \leq \delta_{cr} \\ 1 - 0.85[\delta(t) - \delta_{cr}], \delta(t) \leq 0.3 \\ 0.745 + 0.7\delta_{cr}, \delta(t) > 0.3 \end{cases} \quad (13)$$

综合考虑一般大气环境下混凝土强度退化、钢筋截面面积减少、钢筋强度退化及钢筋混凝土黏结性能退化,以第一类 T 形截面为例,建立锈蚀钢筋混凝土结构抗力 R 计算模型:

$$R(t) = k_p k(t) A(t) f_y(t) \left[h_0 - \frac{f_y(t) A(t)}{2 f_c(t) b} \right] \quad (14)$$

式中: k_p 为抗力计算模式不定性随机变量; $f_y(t)$ 、 $f_c(t)$ 分别为钢筋时变抗拉强度和混凝土时变抗压强度; h_0 为 T 形截面有效高度; b 为 T 梁翼缘板宽度。

由于抗力退化的随机过程十分复杂,无法直接求出解析解,采用蒙特卡罗模拟求解其服从对数正态分布的统计参数。

1.2 荷载效应统计参数

1.2.1 恒载效应统计参数

桥梁恒载主要由主梁自质量和桥面铺装自质量组成,属于永久作用,在设计基准期内作为固定值,可采用正态分布随机变量概率模型模拟。根据文献[13],结构恒载统计结果为 20% 沥青混凝土桥面自质量 + 80% 主梁自质量,其统计参数为:

$$\mu_G = 1.104 \ 8 G_k \quad (15)$$

$$\sigma_G = 0.043 \ 7 G_k \quad (16)$$

式中: G_k 为桥梁结构恒载设计值,根据结构尺寸与材料标准密度求得恒载值。

1.2.2 活载效应统计参数

车辆荷载是最主要的可变荷载,它对桥梁的影响受多种因素的影响,如车辆自质量或轴载质量、车距或轴距等^[14]。根据《公路工程结构可靠度设计统一标准》,车辆荷载有一般运行状态和密集运行状态两种情况,且设计基准期内最大值均服从极值型 I 分布。密集运行状态下统计参数如下:

$$\mu_{SQ1} = 0.799 \ 5 S_{Q1k} \quad (17)$$

$$\sigma_{SQ1} = 0.068 \ 9 S_{Q1k} \quad (18)$$

一般运行状态下统计参数如下:

$$\mu_{SQ2} = 0.696 \ 1 S_{Q2k} \quad (19)$$

$$\sigma_{SQ2} = 0.107 \ 6 S_{Q2k} \quad (20)$$

式中: S_{Q1k} 、 S_{Q2k} 分别为按公路 I 级和 II 级车道荷载计算得到的弯矩效应标准值。

桥梁总车辆荷载效应为一般运行状态下荷载效应和密集运行状态下荷载效应的组合^[15],可用式(21)表示。通过提高密集行车状态的占比 p 模拟桥梁在未来服役期内交通量增长这一非平稳车载过程,进行非平稳效应分析。

$$S_Q = p S_{Q1} + q S_{Q2} \quad (21)$$

式中: p 为密集运行状态占比; q 为一般运行状态占比; $p + q = 1$ 。

活载效应统计参数如下:

$$\mu_{SQ} = p \mu_{SQ1} + q \mu_{SQ2} \quad (22)$$

$$\sigma_{SQ} = \sqrt{(p \sigma_{SQ1})^2 + (q \sigma_{SQ2})^2} \quad (23)$$

1.3 主梁时变可靠度计算

在桥梁维修管理中,通常利用可靠度指标预测和评估桥梁的性能,并以此为依据判断何时采用何种程度的维修策略。桥梁结构状态 $Z(t)$ 可用以下功能函数表示:

$$Z(t) = R(t) - S_G - S_Q(t) \quad (24)$$

式中: $R(t)$ 为结构时变抗力; S_G 为恒载效应; $S_Q(t)$ 为活载效应。

根据上述公式求得的抗力、恒载及活载效应的统计参数,代入 MATLAB 编写的一次二阶矩法程序中,得到时变失效概率 $p_f(t)$ 与时变可靠度 $\beta(t)$:

$$p_f(t) = P[Z(t) < 0] = \int_0^{+\infty} f[Z(t)] dZ \quad (25)$$

$$\beta(t) = \Phi^{-1}[1 - p_f(t)] \quad (26)$$

式中: $f[Z(t)]$ 为功能函数的概率密度函数; $\Phi^{-1}(\cdot)$ 为标准正态累积分布函数的逆函数。

由于桥梁结构抗力劣化是一个连续的随机过程,为便于计算,通常使用时间离散法将桥梁生命周期按年进行离散,得到累积失效概率与失效概率间的关系为:

$$P_{fc} = 1 - \prod_{t=1}^T [1 - p_f(t)] \quad (27)$$

式中: $p_f(t)$ 为结构在第 t 年的失效概率; T 为桥梁设计基准期。

2 基于改进 NSGA-II 算法的主梁维修策略优化决策模型

2.1 基本维修策略模型

维修策略一般包括维修时间和维修程度两个主

要方面^[16]。根据维修时结构性能的不同,将维修活动分为预防性维修(PM)和必要性维修(EM)。预防性维修的目的是延缓结构达到性能阈值的时间,如对混凝土主梁表面裂纹进行修补、涂层等。必要性维修是为了在达到阈值时提高性能而进行维修,如针对桥梁主要受力结构进行粘贴钢板加固、体外预应力加固和换梁改造等^[17]。

为简化模型计算,做如下基本假定:预防性维修维护效果的持续时间 T_{pd} 相等,为 5 年^[18];预防性维修只能防止结构在维护效果持续时间内的恶化,不能提高结构抗力水平;必要性维修活动能使结构抗力水平恢复到初始水平。不同维修活动对结构可靠度指标的影响见图 1。由图 1 可知:当车辆荷载保持不变时,曲线 ab 平行于曲线 cd ;当车辆荷载随时间呈非平稳增长时,曲线 ef 的斜率小于曲线 gh 的斜率,且每一次必要性维修后可靠度指标均低于前一次维修后的初始值。

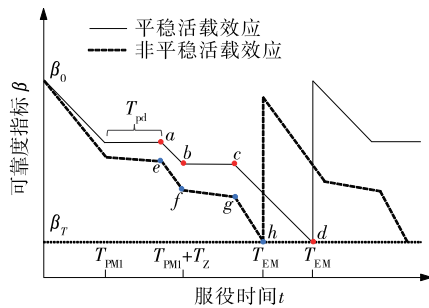


图 1 不同维修活动作用下桥梁可靠度的时变规律

2.2 维修成本模型

桥梁维修成本包含直接维修成本和间接维修成本。直接维修成本是指与维修活动直接相关的人工、材料及机械费用,与不同维修活动的次数有关;间接维修成本是指结构在服役期间进行定期检测的费用、日常养护费用及开展维修活动时关闭桥梁对个人和社会造成的影响。预防性维修在维修期间对桥梁的正常使用影响较小,可以有效降低维修成本;必要性维修在维修期间需部分或全部关闭桥梁,用户成本很高,维修成本增加。本文仅考虑必要性维修会对桥梁运营产生影响,并将该影响纳入必要性维修直接成本中,以简化运算。桥梁结构的累积维修成本现值 C_{PCMC} 为:

$$C_{PCMC} = \sum_{k=1}^{T/f} \frac{C_{ins}}{(1+r_c)^{t_k}} + \sum_{i=1}^{n_{pm}} \frac{C_{pm}}{(1+r_c)^{t_i}} + \sum_{j=1}^{n_{em}} \frac{C_{em}}{(1+r_c)^{t_j}} \quad (28)$$

式中: f 为桥梁定期检测与日常养护频率(年/次); C_{ins} 为桥梁定期检测与日常养护的费用; r_c 为折现率,取 4%,且恒定不变,体现货币的时间价值,本文假定结构服役起始年为折现基准年; t_k 为未考虑折现率的第 k 次检测与养护时间; n_{pm} 、 n_{em} 分别为结构服役期间预防性维修和必要性维修次数; C_{pm} 、 C_{em} 分别为未考虑折现率的预防性维修与必要性维修的直接成本; t_i 、 t_j 分别为第 i 次预防性维修与第 j 次必要性维修开始实施的时间,且在同一时间节点不能同时采取预防性维修与必要性维修。

2.3 维修策略多目标优化问题构建

本文提出的考虑非平稳荷载过程的主梁体系维修策略优化问题等价于寻找合适的时间采取相应维修活动使结构累积失效概率 P_{fc} 、累积维修成本现值 C_{PCMC} 同时最小化问题,其中累积失效概率体现主梁体系在整个服役期间的整体可靠度水平,累积维修成本现值体现维修策略在结构服役期间的经济效益。预防性维修首次使用时间可在桥梁建成至服役年限结束 T 的任何时间进行,而后续使用时间间隔通常不应少于预防性维修效果的持续时间 T_{pd} ^[19]。维修策略多目标优化模型描述如下:

(1) 设计变量。预防性维修首次使用时间 T_{PMI} 和使用时间间隔 T_Z 。

(2) 约束条件为 $\beta(t) \geq \beta_T$ 、 $0 < T_{PMI} < T$ 、 $T_{pd} < T_Z < T$ 。

(3) 目标函数为 $\min P_{fc}$ & $\min C_{PCMC}$ 。

运用上述模型,通过对预防性维修与必要性维修活动的合理安排,可以进一步权衡结构服役期间的性能与成本,从而得到结构性能与维修成本同时最优的维修方案。而常规维修策略中,维修成本降低会导致结构性能下降。鉴于两个目标存在冲突,使用多目标优化算法予以求解。

2.4 基于 NSGA-II 的多目标优化算法

Deb K. 等针对 NSGA 的不足,引入快速非支配排序、精英策略和拥挤距离计算,提出 NSGA-II 算法^[20]。该算法能有效降低算法复杂度,保证种群多样性,提高计算效率,被广泛应用于多目标优化问题求解。在桥梁维修领域,NSGA-II 同样得到广泛应用^[21],如 Peng J. X. 等采用 NSGA-II 算法权衡累积失效概率、总成本及 CO_2 排放,得到了考虑可持续准则的劣化箱梁维修策略^[22]; Han X. 等通过 NSGA-II 算法寻求多主梁钢桥的更换时间节点与位置,使全寿命周期失效概率与成本最优^[8]。

使用 NSGA-II 算法进行维修策略多目标优化的步骤:1) 初始化 NSGA-II 参数、决策变量的范围和最大迭代次数。2) 假设种群规模为 N , 利用目标函数随机生成初始种群 P_0 。3) 进行快速非支配排序, 确定种群中每个成员 P_i 的秩和拥挤距离。4) 进行选择(二元锦标赛选择)、交叉(模拟二进制交叉, SBX)和变异(多项式变异), 得到新的中间种群 Q_i 。5) 采用精英保留策略, 亲本群体和中间群体合并形成下一代新群体 $S_i = P_i \cup Q_i$, 此时种群大小为 $2N$ 。在非支配排序的基础上选择最佳染色体, 将 S_i 的大小减少到 N , 得到下一个亲本群体 P_{i+1} 。6) 检查是否满足终止条件, 若生成的计数器 G_{en} 等于最大迭代次数, 则多目标优化过程完成, Pareto 最优解集为多目标优化结果; 否则, 设 $G_{en} = G_{en} + 1$, 转至步骤 3。

2.5 改进理想点决策算法

通过 NSGA-II 优化得到一组 Pareto 最优解集, 解集中的所有解都是非支配解, 至少在一个目标上优于另一个, 但在所有目标上并不都优于另一个。决策者应根据自身实际需求从 Pareto 最优解集中选择一个特定的解来满足目标函数。例如, 当桥梁管理部门的可支配资金不足时, 决策者通常偏向于通过降低结构可靠度来降低维修成本。为找出符合决策者偏好的唯一最优解, 采用改进理想点法进行决策^[23]。步骤如下:

(1) 对非支配解对应的各目标值按式(29)进行

归一化处理。

$$f_i^n(X^m) = \frac{f_i(X^m) - f_i^{\min}}{f_i^{\max} - f_i^{\min}} \quad (29)$$

式中: $f_i^n(X^m)$ 、 $f_i(X^m)$ 分别为第 i 个目标的归一化值和原始值; X^m 为 Pareto 前沿中的第 m 个非支配解; $f_i^{\max}$ 、 $f_i^{\min}$ 分别为 Pareto 前沿中第 i 个目标的最大值和最小值。

(2) 对理想点进行归一化处理。理想点是由各个目标在 Pareto 前沿上的最优值所组成的点。本文的两个目标都是最小化, 则 Pareto 前沿上两个目标的最优值的归一化值均为零。

(3) 按式(30)计算归一化 Pareto 前沿中各支配解到归一化理想点的加权欧式距离 d_i , 根据距离大小确定 Pareto 前沿解集中解的优先级, 选取离理想点距离最近的解为最优解。

$$d_i = \left[\sum_{k=1}^n \omega_k (f_i^n(X^n) - f_i^{\text{ideal}})^2 \right]^{1/2} \quad (30)$$

式中: ω_k 为第 k 个目标的权重系数, $\sum_{k=1}^n \omega_k = 1$; f_i^{ideal} 为第 i 目标值的理想解的归一化值。

利用 NSGA-II 算法进行主梁维修决策多目标优化, 将得到的优化结果通过理想点法进行归一化排序, 寻找最优维修方案, 最终实现主梁服役期间的维修经济性与服役安全性。结合 NSGA-II 算法与改进理想点法的主梁维修多目标优化和决策流程见图 2。

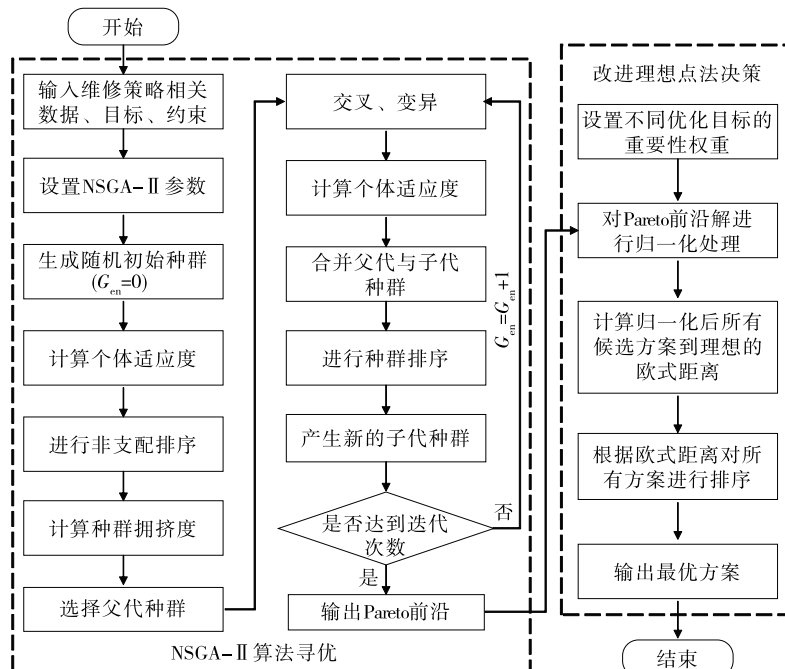


图 2 基于 NSGA-II 和改进理想点法的主梁维修多目标优化、决策流程

3 算例分析

选取某在役钢筋混凝土简支 T 梁桥进行分析。该桥设计荷载为公路 II 级,计算跨径为 19.4 m,行车道宽度为 7.0 m。桥梁上部结构由 5 片 T 梁组成,主梁采用 C25 混凝土与 HRB 335 钢筋,桥面铺装为 9 cm 厚 C25 混凝土+3 cm 厚沥青混凝土。桥梁横断面见图 3。

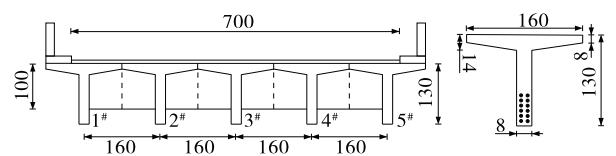


图 3 T 梁桥横截面尺寸及配筋示意图(单位:cm)

由于该桥的混凝土 T 梁都处于同种交通状况和环境下,认为 5 片梁的性能完全相关,一旦其中一片主梁需要维修,主梁体系就应采取相应的维修措施。本文针对受力最不利的边主梁开展维修策略多目标优化和决策分析。

3.1 时变可靠度计算

综合考虑混凝土强度、钢筋强度、钢筋截面面积、黏结强度退化等因素对桥梁结构材料参数的影响,通过对每个时间节点的抗力退化进行 100 000 次蒙特卡罗模拟,得到桥梁抗力退化时变统计参数。

根据桥梁设计图纸,结合式(15)、式(16),计算得到边主梁恒载效应的平均值为 856.09 kN·m、标准差为 36.87 kN·m。根据《公路桥涵设计通用规范》对公路 I 级和 II 级车道荷载的规定,考虑冲击系数的影响,结合式(17)~(20),计算得到边主梁车辆荷载效应统计参数(见表 1)。

表 1 边主梁车辆效应统计参数			单位:kN·m
荷载效应类型	运行状态	平均值	标准差
跨中弯矩	一般运行状态	416.94	65.39
	密集运行状态	739.69	63.75

通过改变密集运行状态的占比得到不同交通状况下车辆荷载统计参数,将其与抗力、恒载统计参数一并代入一次二阶矩法中进行计算,得到不同交通状况下主梁时变可靠度。

随着社会经济的发展,区域交通量逐年上升,体现在密集行车占比逐年增加。假定密集行车初始占比 $p=0.15$ 且保持恒定不变即 $\Delta p=0$ 为基本运行状态,为分析交通量增长对桥梁时变可靠度的影响,

在基本运行状态的基础上,每年 Δp 分别以 0.003、0.005、0.007 的增量值逐年增加,得到不同交通量年均增长率下时变可靠度指标(见图 4)。

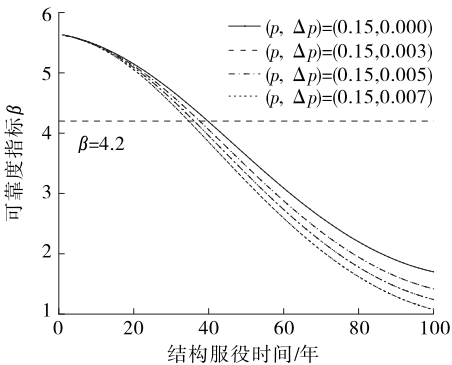


图 4 交通量增长对时变可靠度的影响

从图 4 可以看出:在考虑非平稳车载的情况下,结构可靠度明显下降,下降幅度随交通量增加而增大;同时随着交通量年均增长率的上升,可靠度下降速率加快。根据结构安全等级,选定主梁目标可靠度为 4.2,该桥在 4 种交通状况作用下的可靠度指标分别在第 41 年、第 38 年、第 37 年、第 35 年时下降到可靠度阈值,此时需进行适当的维修活动,以保障桥梁的安全服役。

3.2 双目标优化结果与分析

在该桥安全性与经济性权衡分析中,假设预防性维修和必要性维修在不同时间点均采取相同的维修措施。基于同类型桥梁在加固费用方面已有的研究成果,钢筋混凝土 T 梁桥需每年定期检修,且桥梁在进行必要性维修活动时产生的间接费用为 70 万元,维修活动的成本与作用效果见表 2。每次维修活动的持续时间相对于桥梁服役时间跨度可以忽略不计。此外,使用 NSGA-II 进行优化时,参数设置如下:初始种群规模为 50 个,交叉概率为 0.8,突变概率为 0.2,最大迭代次数为 50 次。

表 2 不同维修活动的成本与作用效果		
维修活动类型	成本/万元	作用效果
日常检修	4	—
预防性维修	97	保持性能 5 年不变
必要性维修	594	将抗力提升到初始状态

通过对基本运行状态下主梁体系维修策略的优化,得到相应非劣解集,这些解的累积维修成本现值和累积失效概率见图 5(a)。从图 5(a)可以看出:维修成本增加时,权衡曲线的斜率逐渐减小,说明随着

维修成本投入的增加,结构失效概率开始迅速下降,维修成本投入水平较高时,下降速度放缓;当维修成本超过 4.03×10^6 元时,结构失效概率基本稳定,表明过度的维修不会带来结构性能本质的提升。这一结果符合边际效用递减理论,即资金利用效率随着维修成本投入的增加而逐渐降低。

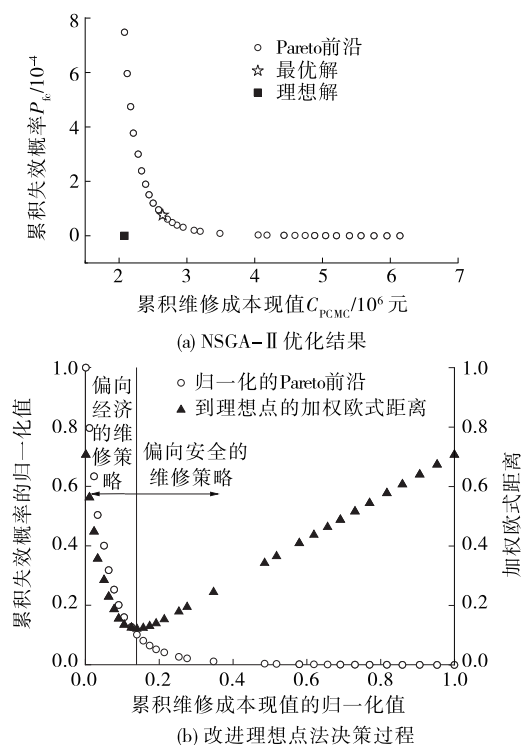


图 5 考虑 P_{fc} 和 C_{PCMC} 的维修策略双目标优化

为了找出安全性和经济性等不同目标间的最优解,采用改进理想点法进行多目标最优解集决策。图 5(b)为结构安全性和维修经济性同等重要的情况下的决策过程,将维修成本与失效概率两个目标函数值进行归一化处理,并计算相应的加权欧式距离,选取数值最小的为最优解。基本运行状态下维修策略的最优解为 $P_{fc} = 7.618 \times 10^{-5}$ 、 $C_{PCMC} = 2.6347 \times 10^6$ 元,此时 $T_{PMI} = 25$, $T_z = 5$ 。由图 5(b)可知:最优解左侧的维修策略更偏向于结构服役期间的维修经济性,右侧的维修策略更偏向于服役期间结构安全性,决策者可根据自身需求选取最有效的维修策略。

为了分析不同交通量年均增长率对主梁体系维修策略的影响,在基本运行状态的基础上,选取不同的密集行车初始占比,并将密集行车占比以每年 0.003、0.005、0.007 的增量值增加,分析密集行车占比上升对 Pareto 前沿的影响,结果见图 6。从图 6(a)

可以看出:3 条权衡曲线的总体趋势相似,但在变化速率上有所不同。随着密集行车占比年增量值的上升,权衡曲线整体上移,维修成本增加,失效概率上升。表明随着密集行车占比的增加,需要进行的维修活动增多,需投入更多的维修成本来保持结构的安全性能。

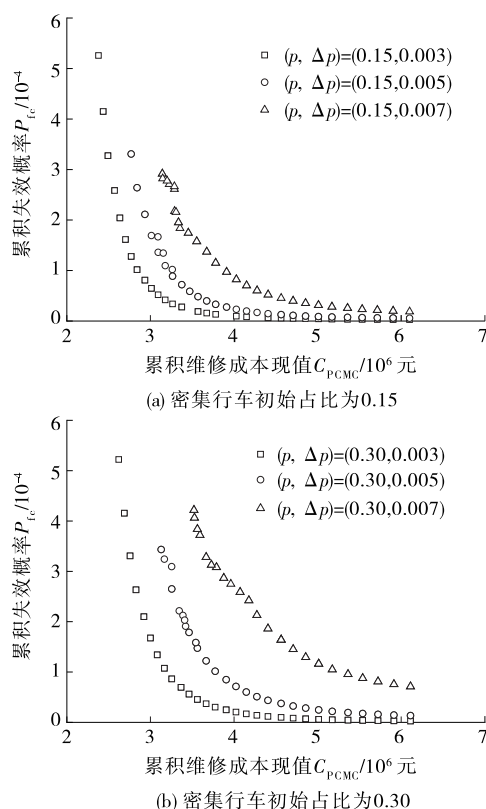


图 6 密集行车占比上升对 Pareto 前沿的影响

对比图 6(a)、图 6(b),当密集行车初始占比从 0.15 上升到 0.30 时,随着密集行车占比年增量值的上升,3 条权衡曲线间的差异更加明显。表明密集行车初始占比越高,车辆荷载的非平稳增长对桥梁可靠度-成本权衡方案的影响越显著。在考虑桥梁维修资金分配时,应重点关注初始交通量大且增速较快区域的桥梁。

4 结论

(1) 基于蒙特卡罗抽样和一次二阶矩法相结合的方法,综合考虑抗力退化和车辆荷载增加的双随机过程,建立钢筋混凝土主梁时变可靠度模型。分析发现随着交通量的增长,桥梁可靠度指标迅速下降,交通量年均增长率越大,可靠度指标下降越快,需提前进行相应维修活动来保障桥梁的服役安全。

(2) 使用基于 NSGA-II 算法的多目标优化模

型,能有效捕捉交通量增长对维修策略的影响,为桥梁管理部提供兼具结构安全性和维修经济性的折中维修策略。采用改进理想点决策模型,可以帮助桥梁管理部门根据自身需求选取最优桥梁维修策略。

(3) 投入的维修成本越高,结构安全性越高,资金利用率越低,当维修成本超过一定界限时,过度的成本投入不会带来结构性能显著提升。交通量增长会导致维修成本增加、结构失效概率上升,且区域初始交通量越大,桥梁维修策略对交通量的增长越敏感。

参考文献:

- [1] FRANGOPOL D M, LIN K Y, ESTES A C. Life-cycle cost design of deteriorating structures[J]. *Journal of Structural Engineering*, 1997, 123(10): 1390-1401.
- [2] ENRIGHT M P, FRANGOPOL D M. Maintenance planning for deteriorating concrete bridges[J]. *Journal of Structural Engineering*, 1999, 125(12): 1407-1414.
- [3] KONG J S, FRANGOPOL D M. Life-cycle reliability-based maintenance cost optimization of deteriorating structures with emphasis on bridges[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2003, 129(6): 818-828.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] XIE H B, WU W J, WANG Y F. Life-time reliability based optimization of bridge maintenance strategy considering LCA and LCC[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 176: 36-45.
- [7] LIU Z X, GUO T, CORREIA J, et al. Reliability-based maintenance strategy for gusset plate connections in steel bridges based on life-cost optimization[J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2020, 34(5): 04020088-04020099.
- [8] 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: 112633.1-112633.13.
- [9] 姜超, 丁豪, 顾祥林, 等. 锈蚀钢筋混凝土梁正截面受弯破坏模式及承载力简化计算方法[J]. *建筑结构学报*, 2022, 43(6): 1-10.
- [10] 李永重, 田仲初, 李智. 砼结构耐久性研究现状综述[J]. *公路与汽运*, 2017(1): 183-187.
- [11] 赵羽习, 金伟良. 钢筋锈蚀导致混凝土构件保护层胀裂的全过程分析[J]. *水利学报*, 2005, 36(8): 939-945.
- [12] 惠云玲, 林志伸, 李荣. 锈蚀钢筋性能试验研究分析[J]. *工业建筑*, 1997, 27(6): 11-14+34.
- [13] 邹天一. 结构可靠度[M]. 北京: 人民交通出版社, 1998.
- [14] 张恒, 罗雷. 某连续刚构桥体外预应力加固后承载力评估[J]. *公路与汽运*, 2022(6): 122-126.
- [15] 陈水生, 赵辉, 李锦华, 等. 大气环境下的钢筋混凝土桥梁时变可靠度分析[J]. *计算力学学报*, 2022, 39(5): 591-597.
- [16] 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.
- [17] NEVES L A C, FRANGOPOL D M, PETCHERD-CHOO A. Probabilistic lifetime-oriented multiobjective optimization of bridge maintenance: combination of maintenance types[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2006, 132(11): 1821-1834.
- [18] 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. 1-04013043.13.
- [19] OKASHA N M, FRANGOPOL D M. Lifetime-oriented multi-objective optimization of structural maintenance considering system reliability, redundancy and life-cycle cost using GA[J]. *Structural Safety*, 2009, 31(6): 460-474.
- [20] 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.
- [21] 王小明, 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.
- [22] PENG J X, YANG Y M, BIAN H B, et al. Optimisation of maintenance strategy of deteriorating bridges considering sustainability criteria[J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2022, 18(3): 395-411.
- [23] 易茜, 何爽, 宁轻, 等. 汽车试制车间考虑员工工作能力的多目标优化生产调度[J]. *中国机械工程*, 2021, 32(13): 1617-1629.

收稿日期: 2023-03-10