

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.04.020

基于LCA和LCC的桥梁全生命周期维护决策优化

刘曙光,刘军,刘咏华,王帆

(湖南路桥建设集团有限责任公司,湖南长沙 410004)

摘要:为研究考虑生命周期环境和生命周期成本因素影响下的桥梁全生命周期最优维护策略,以预防性维护和实质性维护作为基本维护方式,以桥梁可靠度、生命周期环境和生命周期成本为目标函数,建立了桥梁全生命周期维护决策的多目标优化模型。推导了桥梁时变可靠度、生命周期环境和生命周期成本指标的量化方式,确定了基于遗传算法的桥梁生命周期维护决策优化问题的计算流程。以某预应力混凝土连续T形梁桥为算例,分析了该桥的最优维护策略集。研究表明:实施预防性维护可以有效提高桥梁的可靠性概率并减少实质性维护的次数,同时能够降低生命周期成本和环境影响;实施预防性维护可以较好地延长首次实施实质性维护的时间,并能延缓可靠度指标的降低。

关键词:桥梁;维护决策优化;实质性维护;预防性维护;生命周期环境影响;生命周期成本

中图分类号:U445.7

文献标志码:A

0 引言

近年来,中国建造了大量桥梁,大多数桥梁在其生命周期内均需要进行维修,以确保正常运营,并且投入的维护费用巨大^[1-3]。此外,桥梁维护过程中会消耗大量的能源和资源,对周围环境造成较大影响。因此,从生命周期的角度出发,考虑结构安全、成本和环境影响等因素,对桥梁维护策略进行优化具有重要意义。

作为桥梁维护的两个重要指标,结构安全和成本在桥梁维护决策优化中得到了众多研究人员的关注。Biondini等^[4]提出了桥梁预防性维护(PM)策略,以估计预防性维护的最佳时间,并指出了预防性维护对桥梁可靠度、劣化率以及劣化延缓时间的影响;Ghodoosi等^[5]利用遗传算法,基于双二次系统可靠度的桥梁劣化模型和整个规划内生命周期成本的财务优化模型,以尽可能低的生命周期成本保证结构可靠度为目的,开发了一种极具效益的桥梁维护方法;程健等^[6]基于粒子群算法,以桥梁可靠度和维护成本作为优化目标,以某简支梁桥为例,得到了该桥的最优维护策略集。

近年来,相关学者主要从生命周期环境(LCA)和生命周期成本(LCC)的角度对桥梁维护决策进行优化^[7-8]。Rodrigues等^[9]从环境、成本和社会文化等角度出发,研究了木材-混凝土复合材料(TCC)替代桥面板的可持续性,García-Segura等^[10]以最小维护成本、最长锈蚀起始时间和最大结构可靠度为优化目标,提出了一种在锈蚀影响下的混凝土箱形梁桥维护策略优化方法。然而,上述方法仅将实质性维护作为维修措施,以此来优化桥梁维护的初始时间和维护次数,在桥梁生命周期中没有考虑必要的预防性维护。本文从桥梁全生命周期维护的角度出发,采用可靠度作为桥梁结构安全性的表征指标,以最大化桥梁可靠度指标、最小化生命周期成本和环境影响为优化目标,建立桥梁全生命周期维护决策的多目标优化模型。基于遗传算法,通过工程算例得到桥梁的最优维护策略集,以验证该研究方向的正确性,最后分析无预防性维护和各最优维护策略下的桥梁性能。

1 桥梁时变可靠度模型

桥梁时变可靠度 $Z(t)$ 可用一个性能函数表

收稿日期:2023-04-23(修改稿)

基金项目:湖南省交通科技项目(编号:202013)

作者简介:刘曙光,男,大学本科,高级工程师.E-mail:602457243@qq.com

示^[11],如式(1)所示:

$$Z(t) = R(t) - S(t) \quad (1)$$

式中: $R(t)$ 为随时间变化的结构抗力; $S(t)$ 为随时间变化的荷载效应。

考虑到桥梁性能的不确定性,一般将桥梁时变可靠度表示为概率形式^[12],如式(2)所示:

$$P_f(t) = P[Z(t) < 0] = 1 - \int_0^{+\infty} f[Z(t)] dZ \quad (2)$$

式中: $P_f(t)$ 为桥梁结构的失效概率; $f(\cdot)$ 为概率密度函数。

通常用可靠度指标 β 来替代桥梁结构的失效概率 $P_f(t)$,如式(3)所示:

$$\beta(t) = \phi^{-1}[P_f(t)] \quad (3)$$

式中: $\phi^{-1}(\cdot)$ 为正态分布函数的倒数。

针对桥梁结构可靠度指标 β 随时间变化的规律,本文采用邵旭东等^[13]提出的桥梁非线性劣化指数模型,如图1所示,与基于可靠度指标的双线性模型^[14]相比,该模型较为准确,其数学表达式为:

$$\beta(t) = \begin{cases} \beta_0, & 0 \leq t \leq T_0 \\ \beta_0 - \alpha(t - T_0), & t > T_0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: β_0 为桥梁结构的初始可靠度指标值; α 为桥梁结构可靠度指标劣化率,随机变量 α 服从均匀分布; T_0 为桥梁劣化的初始时间,随机变量 T_0 服从对数正态分布。

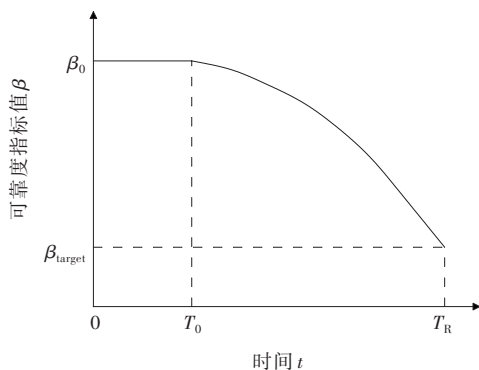


图1 桥梁可靠度指标的双线性劣化模型

图1中, β_{target} 为桥梁的目标可靠度,根据规范^[15]要求可取为4.2; T_r 为桥梁总维护时间。

当桥梁结构的可靠度小于目标可靠度 β_{target} 时,则需要对桥梁进行实质性维护。因此,第一次实质性维护的时间 T_r 可通过式(5)计算:

$$T_r = \frac{\beta_0 - \beta_{\text{target}}}{\alpha} + T_0 \quad (5)$$

2 桥梁生命周期环境影响分析

生命周期环境评价(即LCA)是指一个产品体系在全生命周期内的投入与输出对环境产生影响的评估方法。本文采用国际化标准组织(ISO)规定的LCA框架,其中基于流程的LCA是特定分析中的一种基本方法,即终点破坏法,与其他方法相比,该方法更适用于对特定案例的环境影响分析,并且可以更加客观地评估对环境造成的最终影响^[16],采用该方法确定桥梁生命周期环境影响的步骤如图2所示。

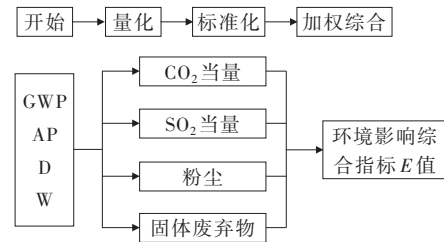


图2 LCA量化、标准化过程

图2中:GWP、AP、D和W分别为全球变暖影响、酸化影响、粉尘和固体废弃物;环境影响综合指标 E 的量化和标准化,采用武文杰等^[17]给出的计算方法。

3 桥梁生命周期成本分析

桥梁LCC是指其在各个阶段成本的总和,主要包括建设阶段、运营阶段以及退役阶段等^[18-20]。此外,在桥梁生命周期成本模型中还应考虑成本的时间价值,为此引入了贴现率。本文主要考虑初始成本、维护成本和退役成本。桥梁生命周期内的总成本可以表示为:

$$C_{\text{LCC}} = C_c + C_y + C_T \quad (6)$$

式中: C_c 为初始成本; C_y 为运营成本; C_T 为退役成本。

其中,初始成本主要发生在建设阶段,可根据相关竣工资料得到;退役成本主要是桥梁拆除时的支出;运营成本是桥梁使用阶段的支出,主要包括预防性维护成本、实质性维护成本、用户成本和社会成本。运营成本的计算式可以表示为:

$$C_y = C_{m_a} + C_{m_i} + C_{c_u} \quad (7)$$

式中: C_{m_a} 为预防性维护成本; C_{m_i} 为实质性维护成本;

C_{cu} 为用户成本。

其中,用户成本 C_{cu} 是指桥梁维修期间车辆的绕行成本和绕行产生的时间成本^[20],计算方法^[21]如式(8)~(10)所示:

$$C_{cu} = C_r + C_t \quad (8)$$

$$C_r = C_v L_d A_{DT} d_d \quad (9)$$

$$C_t = \left[C_{ad} O_{car} \left(1 - \frac{T_p}{100} \right) + C_{trk} \frac{T_p}{100} \right] \frac{L_d A_{DT} d_d}{s} \quad (10)$$

式中: C_r 为桥梁维修期间车辆的绕行成本; C_t 为绕行所产生的时间成本; C_v 为平均绕行成本; d_d 为桥梁的封闭天数; L_d 为车辆绕行的路程; A_{DT} 为车流量日均值; C_{ad} 为行人绕行单位时间的成本; C_{trk} 为车辆绕行单位时间的成本; O_{car} 为轿车的使用率; T_p 为卡车占过桥车辆总数的百分比; s 为平均绕行速度。

为考虑时间对成本的影响,在计算运营成本时应考虑折现率。因此,运营成本可以进一步表示为:

$$C_{Y1} = \frac{1}{1 + r_d} C_Y \quad (11)$$

式中: r_d 为折现率,根据文献[12] r_d 可取为6%。

4 桥梁生命周期维护决策优化的遗传算法实现

本文选择第二代非支配排序遗传算法(NSGA-II)对桥梁生命周期维护决策进行优化^[10],该算法是在传统遗传算法基本框架基础上提出的,NSGA-II算法是利用拥挤距离来选择更好的个体,并具备精英保留机制。相较于传统的寻优算法,如粒子群算法、蚁群算法以及模拟退火算法等,NSGA-II算法得到的最优解集在空间分布上更为均匀并且多样性较好,计算效率和鲁棒性均有一定提高,并可以更加完美地适用于多目标优化问题。该算法的具体求解步骤如下:

(1) 参数编码。采用二进制对参数进行编码,桥梁由不同的构件组成,构件数假设为 n ,每个构件可用的维修方案假定为 m ,设置算法的最大迭代次数 K_{max} 。

(2) 生成初始种群。随机生成由 x 个个体组成的种群,该群体表示目标函数的可能解集。

(3) 适应度函数评估。本文的适应度函数指桥梁维修优化决策的目标函数(即最大化桥梁的时变

可靠度指标、最小化生命周期成本以及生命周期环境影响指标),遗传算法在计算过程中需根据适应度函数来达到种群进化的目的。

(4) 种群非支配排序。通过个体的支配关系对种群进行排序,并计算各个体的排序等级。

(5) 计算拥挤度距离。

(6) 选择、交叉和变异。根据优胜劣汰的生存法则选择更能适应环境的个体,并进行复制,再进行变异和交叉等操作,从而得到更适应环境的一个种群,其中个体即表示目标函数一个可能的解,种群表示一组解,此过程即为目标函数寻优过程。

(7) 重复步骤(4),使种群不断迭代进化,直至种群收敛到一个最佳的环境,即为问题的最优解。

利用NSGA-II算法对问题进行优化的流程如图3所示。

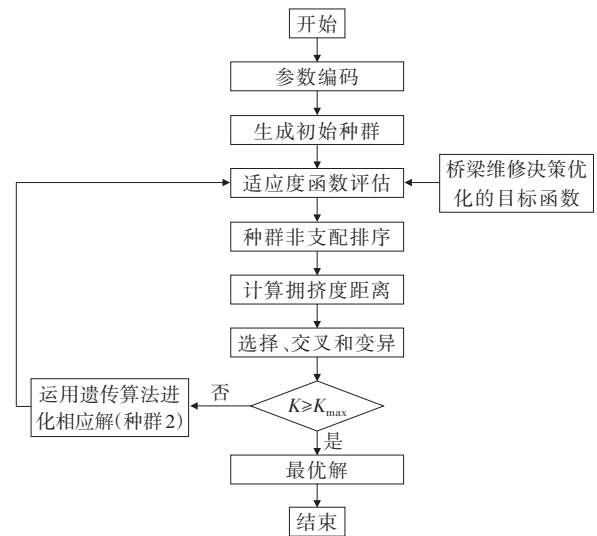


图3 利用NSGA-II算法对问题进行优化的流程图

5 算例分析

5.1 工程概况

以某预应力混凝土T形梁桥来分析考虑桥梁时变可靠度、成本和环境影响的维护决策优化,桥梁全长 3×50 m,桥面宽 11.25 m,桥梁的横截面如图4所示。

本文选取桥梁的上部结构进行计算。该桥在运营阶段的材料清单如表1所示。

5.2 性能函数分析

考虑T梁的抗弯承载力极限状态建立桥梁的性能函数,如式(12)所示:

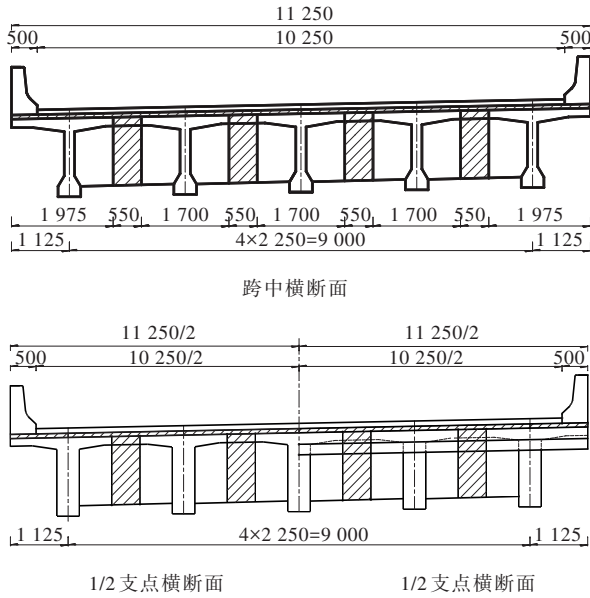


图4 桥梁的横截面示意图(单位:mm)

表1 算例桥梁的资源 and 能源消耗

桥梁维护	螺纹钢 筋/kg	钢绞线/ kg	钢板/ kg	混凝土/ m ³	阻锈剂/ kg	结构胶/ kg	环氧树 脂/m ²	水泥/ t	PVC 管/kg	汽油/ L	水/L	电/ (kW·h)
预防性维护	1 546.7	—	—	245.2	29 544.8	8 262.0	882.9	22.31	—	10 407.4	26 766.7	11 778.4
实质性维护	2 180.1	5 450.2	8 720.3	1 106.8	—	—	—	56.8	88.3	5 646.3	12 746.3	36 514.4

式中: l 为梁长; g_1 为预制梁静载; g_2 为横隔板静载; g_3 为路面静载; λ_b 、 λ_c 分别为梁和横隔板静载路面静载作用下的相关系数。

$$M_b = \lambda_d \left[\alpha_1 \beta_1 \left(\beta_c q_k \frac{l^2}{8} + \beta_c p_k \frac{l}{4} \right) + \beta_r q_r \frac{l^2}{8} \right] \quad (15)$$

式中: λ_d 为可变荷载作用下的相关系数; α_1 为车辆荷载的冲击系数; β_1 为梁的分布系数; β_c 、 β_r 分别为车辆荷载和人群荷载的横向分布系数; q_k 为车道的均布荷载; p_k 为车道的集中荷载; q_r 为人群荷载。

上述性能函数的系数和变量取值可参考相关规范^[23]。

5.3 多目标优化模型

以最大化桥梁的时变可靠度指标、最小化生命周期成本以及生命周期环境影响指标为优化目标,桥梁在设计使用年限 T 内,可靠度指标大于目标可靠度指标为约束条件。其数学表达式见式(16),相关参数主要包括:

已知参数:目标可靠度 β_{target} ;桥梁结构开始退化的时间 T_i ;实施预防性维护对桥梁退化的延缓时间 T_{PMO} 。

待确定参数:首次实施预防性维护的时间 T_{PM1} ;

$$Z = R - S = R - M_a - M_b \quad (12)$$

式中: R 为T梁的抗力,见式(13); M_a 为永久荷载作用下产生的力矩,见式(14); M_b 为可变荷载作用下产生的力矩,见式(15)。

$$R = \begin{cases} \gamma_1 \left[f_s A_s \left(h_0 - \frac{f_s A_s}{2 f_c b'_i} \right) \right] \\ \gamma_1 \left[f_s A_s \left(h_0 - \frac{f_s A_s - f_c h_t (b'_i - b)}{2 f_c b'_i} \right) \right] \end{cases} \quad (13)$$

式中: γ_1 为钢筋混凝土抗弯承载力系数; f_s 为钢筋的屈服强度; A_s 为钢筋截面面积; h_0 、 h_t 分别为梁截面与翼缘的有效高度; f_c 为混凝土的屈服强度; b'_i 为翼缘宽度; b 为腹板高度。

$$M_a = \frac{l^2}{8} \left[\lambda_c (g_1 + g_2) + \lambda_b g_3 \right] \quad (14)$$

实施预防性维护的周期 T_{PMO} 。

$$\begin{cases} \max \beta_i \\ \min C_{\text{LCC}} \\ \min C_{\text{LCA}} \\ \text{subject to } \begin{cases} \beta_i > \beta_{\text{target}} \\ 0 \leq t \leq T \end{cases} \end{cases} \quad (16)$$

式中: T 为桥梁设计使用寿命(年),本文取 $T=100$ 年。

5.4 结果分析

基于遗传算法对桥梁全生命周期的多目标优化模型进行了计算,其中计算可靠度时的失效模式为主梁抗力失效、下缘拉应力失效,选取的随机变量及概率分布见表2。从计算得到的帕累托最优解集中

表2 随机变量统计参数

随机变量	单位	均值 μ	变异系数 C_v	分布类型
混凝土弹性模量	MPa	3.52×10^4	0.10	正态分布
预应力筋弹性模量	MPa	1.95×10^5	0.20	正态分布
混凝土重度	kN/m ³	26.24	0.05	正态分布
预应力筋重度	kN/m ³	78.50	0.10	正态分布
混凝土抗压强度	MPa	32.40	0.10	正态分布
混凝土抗拉强度	MPa	2.64	0.10	正态分布
二期恒载	kN/m	35.00	0.05	正态分布
车道荷载	kN/m	10.50	0.11	极值I型分布

选取了3个最优维护策略进行分析。表3为3个最优维护策略的相关参数,同时也给出了未实施预防性

维护的相关参数。

由表3可知:实施预防性维护可以有效提高桥梁

表3 无预防性维护与最优维护策略对比

维护策略	可靠性 概率/%	LCC/ 万元	生命周期维 护成本/万元	LCA的 E值	预防性维 护次数/次	首次预防性 维护时间/年	预防性维护 周期/年	实质性维 护次数/次	实质性维护 时间/年
无预防性维护	97.21	7 631.6	655.8	3 868.6				6	29,43,57,71,85,99
最优维护策略1	97.42	7 410.2	434.4	2 746.6	8	15	11	2	48,78.5
最优维护策略2	98.63	7 504.6	528.8	3 027.1	7	18	13	3	40,64.5,89
最优维护策略3	98.13	7 462.4	486.6	3 027.1	7	22	12	3	32.5,57,81.5

结构的可靠性概率,并且环境影响综合指标E和生命周期成本都有不同程度的降低,其中桥梁结构可靠性概率最高可提高1.42%(最优维护策略2),环境影响综合指标E最高可下降26.4%(最优维护策略1),生命周期成本最高可减少221.4万元(最优维护策略1)。因此,无论是考虑桥梁结构的可靠性概率,还是成本或环境影响,在桥梁全生命周期维护决策中都需要采用预防性维护。

图5为各维护策略下的可靠度变化曲线。由

图5可知:在桥梁全生命周期(100年)中,实施预防性维护可以显著减少实质性维护的次数,实质性维护次数的减少使桥梁结构的时变可靠度曲线更加平缓,从而提高桥梁结构的可靠性概率;较早地实施预防性维护和较短的预防性维护周期可以较好地延缓首次实施实质性维护的时间,其中最优化策略1将首次实施实质性维护的时间由第29年延迟到了第48年,但相应的预防性维护次数会有所增加。

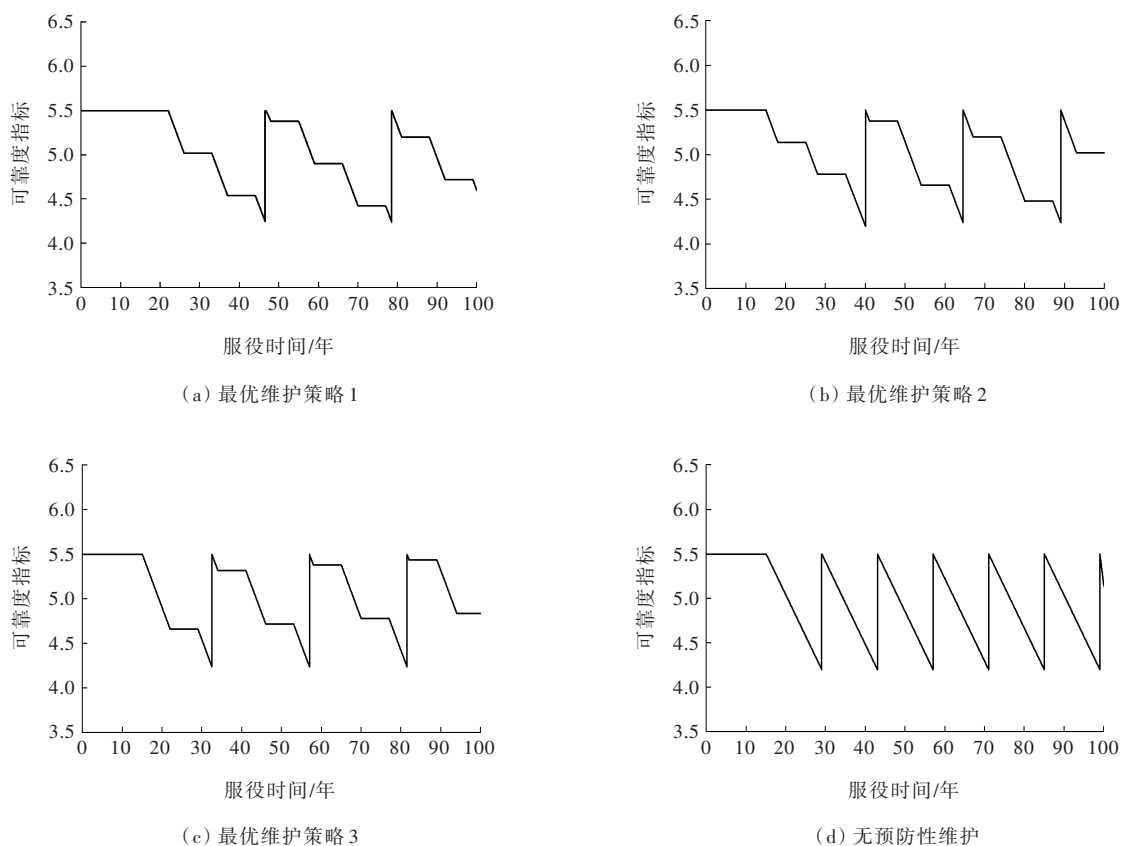


图5 各维护策略下的时变可靠度曲线

图6、7分别为无预防性维护以及各最优维护策略下的环境影响综合指标和生命周期成本的变化曲线。

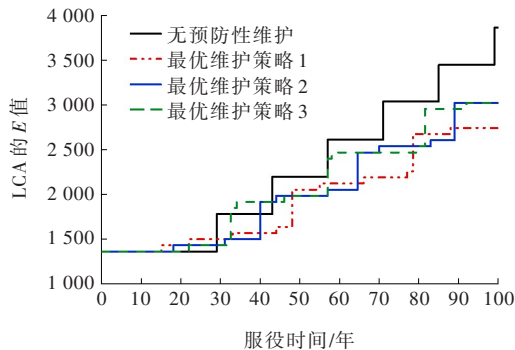


图6 各维护策略下环境影响综合指标E的变化曲线

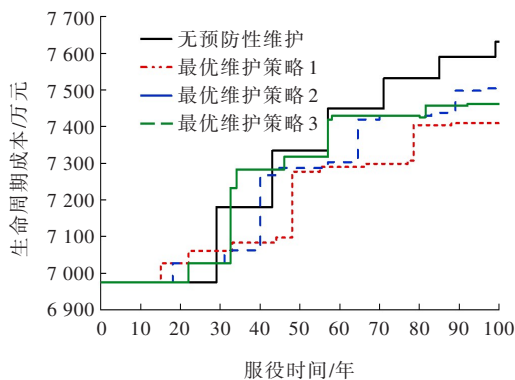


图7 各维护策略下生命周期成本的变化曲线

从图6、7可以看出:实施预防性维护可以降低E值和生命周期成本,首次实施预防性维护时间越早、预防性维护年限越短,桥梁生命周期内的E值越小,这是因为此种最优维护策略(策略1)较其他最优维护策略(策略2和3)的实质性维护次数更少;对比各最优维护策略下的生命周期成本可以发现,较早地实施预防性维护,可以降低桥梁服役前期的成本,例如桥梁服役至第40年,最优维护策略1下的成本较其他维护策略更低,从全生命周期的角度考虑,其生命周期成本也更低;最优维护策略2和3的实质性维护次数和预防性维护次数相同,因此它们的E值相等,然而生命周期成本却不同,这是由于在桥梁全生命周期考虑了时间成本(即贴现率),使维护成本的净现值有所下降。

对于3种最优维护策略均有各自的优缺点,需要管理者根据不同的需求选择不同的维护策略,若仅

从桥梁的可靠性角度考虑,则可以选择最优维护策略2;若生命周期环境影响起重要作用时,则可以选择最优维护策略1;若综合考虑成本和可靠性,则可以选择最优维护策略3。

6 结论

本文从桥梁全生命周期维护的角度出发,综合考虑了桥梁可靠度、生命周期成本和环境影响,以最大化桥梁可靠度指标、最小化生命周期成本和环境影响为优化目标,建立了桥梁全生命周期维护决策的多目标优化模型,得到了桥梁最优维护策略集,主要结论如下:

(1) 在桥梁生命周期内的维护中,实施预防性维护可以有效提高桥梁的可靠性概率并减少实质性维护的次数,同时能够降低生命周期成本和环境影响。

(2) 实施预防性维护可以较好地延长首次实施实质性维护的时间,同时可以延缓可靠度指标的降低,从而提高桥梁的可靠性概率,但会增加预防性维护的次数。

(3) 首次实施预防性维护的时间和维护周期会对实施实质性维护的时间和次数产生影响,较早地实施预防性维护和较短的维护周期,可以减少实质性维护的次数,并且可以降低成本和环境影响。

(4) 桥梁生命周期环境影响的大小主要取决于实质性维护和预防性维护的次数,由于引入了折现率来考虑成本的时间价值,因此还与维护的时间段有关。

参考文献:

- [1] 交通运输部.2020年我国交通运输行业发展统计公报发布[J].隧道建设(中英文),2021,41(6):963.
- [2] 杭京,杨利斌,沈建华,等.钢桁架桥预防性养护技术研究[J].中外公路,2022,42(3):80-84.
- [3] 宋庄庄,朱洪洲.沥青路面全寿命周期节能减排策略案例研究[J].中外公路,2020,40(5):36-42.
- [4] BIONDINI F,FRANGOPOL D M.Life-cycle performance of deteriorating structural systems under uncertainty:Review[J].Journal of Structural Engineering,2016,142(9):F4016001.

- [5] GHODOOSI F, ABU-SAMRA S, ZEYNALIAN M, et al. Maintenance cost optimization for bridge structures using system reliability analysis and genetic algorithms[J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2018, 144(2):04017116.
- [6] 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.
- [7] PANG B, YANG P C, WANG Y F, et al. Life cycle environmental impact assessment of a bridge with different strengthening schemes[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2015, 20(9):1300-1311.
- [8] ZHANG Y R, WU W J, WANG Y F. Bridge life cycle assessment with data uncertainty[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2016, 21(4):569-576.
- [9] RODRIGUES J N, PROVIDÊNCIA P, DIAS A M P G. Sustainability and lifecycle assessment of timber-concrete composite bridges[J]. *Journal of Infrastructure Systems*, 2017, 23(1):04016025.
- [10] GARCÍA-SEGURA T, YEPES V, FRANGOPOL D M, et al. Lifetime reliability-based optimization of post-tensioned box-girder bridges[J]. *Engineering Structures*, 2017, 145:381-391.
- [11] 杨伟军,张建仁,梁兴文.基于动态可靠度的服役桥梁维修加固策略[J]. *中国公路学报*, 2002, 15(3):49-52.
- [12] ANG A H S, DE LEON D. Determination of optimal target reliabilities for design and upgrading of structures[J]. *Structural Safety*, 1997, 19(1):91-103.
- [13] 邵旭东,刘新华,刘代全,等.基于概率的桥梁劣化模型与维护策略关系[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2007, 26(5):32-36, 107.
- [14] 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.
- [15] 交通部公路规划设计院.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.
- [16] 谷立静,林波荣,顾道金,等.中国建筑生命周期环境影响评价的终点破坏模型[J]. *科学通报*, 2008(15):1858-1863.
- [17] 武文杰,王元丰,解会兵.基于LCA和时变可靠度分析的桥梁维护策略优化[J]. *公路交通科技*, 2013, 30(9):94-100.
- [18] 科诺·罗娜,思恩·米根,刘静玲,等.可持续发展实用工具与案例:环境评价卷[M].北京:中国环境科学出版社,2009.
- [19] VEGANZONES MUÑOZ J J, PETERSSON L, SUNDQUIST H, et al. Life-cycle cost analysis as a tool in the developing process for new bridge edge beam solutions [J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2016, 12(9):1185-1201.
- [20] SHIM H S, LEE S H. Developing a probable cost analysis model for comparing bridge deck rehabilitation methods[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2015:1-9.
- [21] THOFT-CHRISTENSEN P. Life-Cycle Cost-Benefit (LCCB) analysis of bridges from a user and social point of view[J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2009, 5(1):49-57.
- [22] BARONE G, FRANGOPOL D M. Life-cycle maintenance of deteriorating structures by multi-objective optimization involving reliability, risk, availability, hazard and cost[J]. *Structural Safety*, 2014, 48:40-50.
- [23] 中交公路规划设计院有限公司.公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范:JTG 3362—2018[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2018.