

## 基于概率的退化钢筋混凝土桥梁加固措施优化

田浩<sup>1,2</sup>, 陈艾荣<sup>1</sup>, 陈亮<sup>2</sup>

(1. 同济大学 桥梁工程系, 上海 200092; 2. 浙江省交通科学研究所, 浙江 杭州 310006)

**摘要:** 提出了一种基于概率的退化钢筋混凝土桥梁加固措施优化分析方法. 选取构件可靠度作为性能指标, 通过寿命函数来衡量结构性能演变过程, 利用结合拉丁超立方抽样和计算机程序 CBDAS 的蒙特卡洛模拟法求解不同时刻的可靠度, 再通过曲线拟合得到相应的寿命函数; 给出加固措施对寿命函数影响的数学模型; 建立了加固措施优化分析方法, 根据可能的维修方案先将初始优化问题划分为一组局部优化问题, 再利用遗传算法求出每个局部优化问题的最优解集, 通过比较不同局部优化问题的最优解集可找出针对任意特定条件的最佳解. 最终, 将建立的优化方法应用到一座位于上海地区的三跨钢筋混凝土桥梁.

**关键词:** 钢筋混凝土桥梁; 寿命函数; 构件可靠度; 加固; 优化; 遗传算法

**中图分类号:** TU 375.4

**文献标识码:** A

### Probabilistic-based Optimization of Maintenance Actions for Deteriorating RC Bridges

TIAN Hao<sup>1,2</sup>, CHEN Airong<sup>1</sup>, CHEN Liang<sup>2</sup>

(1. Department of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Zhejiang Scientific Research Institute of Communication, Hangzhou 310006, China)

**Abstract:** A novel-maintenance-optimization approach under uncertainty is proposed for deteriorating reinforced concrete (RC) bridges. The component reliability is used as performance indicator and the structure performance is modeled by using lifetime function. Firstly, the lifetime function is fitted by using a group of point-in-time component reliabilities evaluated by Monte Carlo simulations, associated with Latin hypercube sampling and the computer program CBDAS. Secondly, models that reflect the effects of maintenance types on the lifetime functions are presented. Finally, a novel approach for optimization of maintenance is

proposed. The original optimization problem is firstly divided into a set of sub-optimization problems based on possible maintenance scenarios. Then the optimal solutions of each sub-optimization problem are sought in terms of genetic algorithm. Thus, the best solution with respect to any specified condition can be found out by comparing the optimal solutions of the sub-optimization problems. The optimization approach is applied to a three-span RC bridge in Shanghai.

**Key words:** RC bridges; lifetime function; component reliability; maintenance; optimization; genetic algorithm

受不断老化的结构的影响和有限的维修资金的限制, 制定合理的退化钢筋混凝土桥梁维修方案已成为工程界的研究热点<sup>[1]</sup>. 为了选取最优的维修策略, 需要解决几个关键问题<sup>[2]</sup>: ①能够较好反映寿命期内结构性能演变的性能指标; ②可用的加固措施及其对结构性能的影响; ③优化问题的构建; ④优化分析方法.

现有研究中常用的性能指标有: 可用性和冗余度<sup>[2]</sup>、时变体系失效概率<sup>[3]</sup>、时变体系可靠度<sup>[4-8]</sup>、状态和安全指标<sup>[9-11]</sup>以及累积破坏概率<sup>[12-13]</sup>. 对于钢筋混凝土桥梁, 现有的分析方法还无法较准确地反映寿命期内结构性能演变, 需要一种准确高效的分析方法来计算结构性能指标. 已有的加固措施大致可分为两类: 预防性维修和必要性维修<sup>[14]</sup>. 对于钢筋混凝土桥梁, 这两类维修措施可分别被进一步分为延迟开锈和延缓锈蚀以及加强性能和更换结构<sup>[15]</sup>. 在已有的针对加固措施优化的研究中, 各种加固措施对结构性能的影响通常假设为固定值而其应用的次数则作为优化问题中的决策变量<sup>[2]</sup>. 因此, 最终得到的最优解集是包含不同数量加固措施的一

收稿日期: 2010-09-23

基金项目: 交通部西部交通建设科技项目(2006 318 223 02-01); 国家“八六三”高技术研究发展计划(2007AA11Z104); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20090072110045)

第一作者: 田浩(1982—), 男, 工学博士, 主要研究方向为混凝土桥梁全寿命设计理论. E-mail: tongjith@gmail.com

通讯作者: 陈艾荣(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为混凝土桥梁耐久性、桥梁抗风.

E-mail: a.chen@tongji.edu.cn.

组维修方案.但是,对于钢筋混凝土桥梁,上述优化问题的构建可能存在以下问题:①由于维修方案中的加固措施数量必须是整数,因此其与加固效应的关系是不连续函数,最优维修方案可能无法找到;②某项加固措施实施时刻的容许区间可能会因其在维修方案中的位置不同而变化,导致优化问题中的约束条件难以确定.所以,需要建立一个针对混凝土桥梁的优化问题构建方法.

本文提出了一种基于概率的退化钢筋混凝土桥梁加固优化分析方法,利用寿命函数反映寿命期性能指标的演变.编写了程序 CBDAS 来模拟寿命期内混凝土桥梁的性能演变过程,通过结合 CBDAS 和拉丁超立方抽样的蒙特卡洛模拟法求解结构性能指标,再利用曲线拟合得到相应的寿命函数;给出了 4 种加固措施对寿命函数影响的数学模型;提出了一种针对混凝土桥梁的加固优化问题构建方法.最后以一座位于上海地区的三跨钢筋混凝土连续梁桥为对象,利用提出的优化方法找出不同特定条件下的合理维修方案.

## 1 寿命期结构性能演变

受劣化环境影响,寿命期内钢筋混凝土桥梁的性能退化可能会非常严重.为了制定合理的维修方案,首先应准确评估寿命期内的结构性能演变.对于加固优化问题,由于大多数性能指标的闭合解难以确定故需要进行多次的性能演变分析,而寿命函数却能通过其闭型解评估寿命期内的结构性能演变过程.但是,退化钢筋混凝土桥梁的寿命函数很难确定,这是因为:①现有的评估方法很难准确模拟由于材料力学性能退化和截面面积削弱引起的结构整体力学性能演变;②大多数概率分析方法或是计算成本较高,或是计算精度无法满足要求.针对以上问题,建立了一种确定退化钢筋混凝土桥梁寿命函数的分析方法.

### 1.1 结构性能演变

当一座钢筋混凝土桥梁出现钢筋锈蚀时,会引起材料力学性能退化和截面面积削弱进而导致结构整体力学性能退化.但是,现有的性能演变分析方法仅仅考虑了材料力学性能退化和钢筋截面削弱对结构承载能力的影响而忽略了以下因素:①混凝土截面削弱对结构承载能力的影响;②钢筋和混凝土截面削弱对结构荷载效应的影响.为了较准确地评估寿命期内混凝土桥梁性能演变过程,笔者编写了分

析程序 CBDAS<sup>[15]</sup>.

### 1.2 随机分析

可靠度是常用的结构性能指标之一,本文将利用构件可靠度作为性能指标来衡量结构性能.构件可靠度可通过一阶(FORM)<sup>[16]</sup>或二阶(SORM)<sup>[17]</sup>二次矩法求解,但是当极限状态方程为高次非线性时这些方法得到的结果精度可能无法满足要求.蒙特卡洛模拟法能够直接准确地求出构件的失效概率进而得到构件可靠度.这个方法的缺点是对于真实结构需要足够多的模拟次数才能得到构件的失效概率,故计算成本很高.为了利用蒙特卡洛模拟计算精度高的优点同时降低计算成本,这里引入了拉丁超立方抽样<sup>[18]</sup>,该抽样技术在得到合理结果的同时能够大幅减小必要的抽样次数<sup>[10]</sup>.

### 1.3 寿命函数

结合分析程序 CBDAS、拉丁超立方抽样以及蒙特卡洛模拟可求解出不同时间点上的混凝土桥梁构件抗力和荷载效应;进而利用统计分析得到构件可靠度;最终,通过一组不同时间点上的构件可靠度利用曲线拟合得到相应的寿命函数.图 1 给出了寿命函数的评估流程.

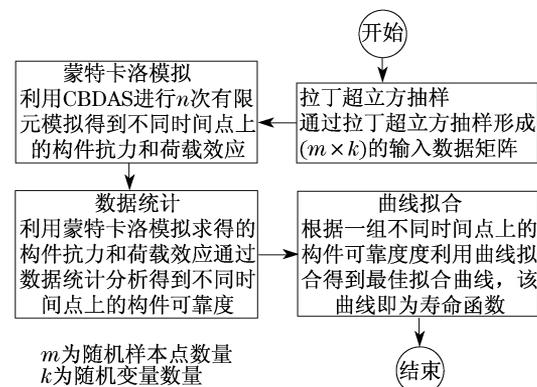


图 1 寿命函数的评估流程

Fig.1 Schematic for evaluating lifetime function

## 2 加固措施

根据寿命期内的结构状态,退化钢筋混凝土桥梁常用的加固措施主要有:延迟开锈、延缓锈蚀、加强性能和更换结构<sup>[15]</sup>.

### 2.1 延迟开锈

当采用延迟开锈的加固措施时结构性能并没有改善,而是通过减缓氯离子在钢筋表面的聚集速度来延迟钢筋锈蚀的开始时刻.因此,延迟开锈能够使寿命函数在时间段  $\Delta T_1$  内保持不变,则寿命函数可

表示为

$$f_1(t) = \begin{cases} f(t) & 0 < t < T_1 \\ f(T_1) & T_1 \leq t < T_1 + \Delta T_1 \\ f(t - \Delta T_1) & t \geq T_1 + \Delta T_1 \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $f_1(t)$  为采用延迟开锈后的寿命函数;  $T$  为加固措施的作用时刻. 这里  $T_1$  应小于钢筋开始锈蚀时刻  $T_c$ , 否则该加固措施将失去作用.

## 2.2 延缓锈蚀

延缓锈蚀的目的是当钢筋已经锈蚀时延缓其锈蚀速率. 故与延迟开锈类似, 延缓锈蚀并没有提高结构性能而仅仅是通过破坏环境条件来延缓锈蚀过程. 因此, 延缓锈蚀的作用假定为保持寿命函数在时间段  $\Delta T_2$  内不退化, 这时寿命函数应为

$$f_2(t) = \begin{cases} f(t) & 0 < t < T_2 \\ f(T_2) & T_2 \leq t < T_2 + \Delta T_2 \\ f(t - \Delta T_2) & t \geq T_2 + \Delta T_2 \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $f_2(t)$  为采用延缓锈蚀后的寿命函数;  $T_2$  为加固措施的作用时刻. 这里  $T_2$  应大于钢筋开始锈蚀时刻  $T_c$ , 同时应小于寿命函数退化至临界值时刻  $T_{[\beta]}$ .

## 2.3 加强性能

加强性能的主要目的是利用各种加固材料提高结构抗力. 加固材料粘贴在混凝土截面的受拉区和腹板区可以分别提高原结构的抗弯和抗剪承载力. 故该加固措施能立刻改善寿命函数, 可表示为

$$f_3(t) = \begin{cases} f(t) & 0 < t < T_3 \\ f(t) + \Delta f & t \geq T_3 \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $f_3(t)$  为采用加强性能后的寿命函数;  $T_3$  为加固措施的作用时刻;  $\Delta f$  为加强性能应用后的寿命函数增量, 可表示为

$$\Delta f = g(A_s) \quad (4)$$

式中:  $A_s$  为加固材料的截面面积. 同  $T_2$  类似,  $T_3$  的上限和下限应分别为  $T_{[\beta]}$  和  $T_c$ .

## 2.4 更换结构

更换结构的应用将使寿命函数恢复到初始值, 故寿命函数应为

$$f_4(t) = \begin{cases} f(t) & 0 < t < T_4 \\ f(t - T_4) & t \geq T_4 \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $f_4(t)$  为采用更换结构后的寿命函数;  $T_4$  为加固措施的作用时刻. 与延缓锈蚀和加强性能类似,  $T_4$  的上限和下限应分别为  $T_{[\beta]}$  和  $T_c$ .

# 3 加固措施优化

加固措施优化的根本目的是制定一套经济合理

的维修方案以保证结构体系在寿命期内始终处于良好的工作状态. 最优维修方案可能是由几种加固措施按合理序列组成或是仅包含一种加固措施. 明显可知: ①当使用相同的几种加固措施但其序列不同时, 加固后的寿命函数可能截然不同; ②由于加固措施序列不同, 一些决策变量如  $T_1 \sim T_4$  的取值范围也可能发生变化; ③某些序列的加固措施可能无法在实际的钢筋混凝土桥梁上实现. 此外, 还需要搜寻加固措施的最佳序列, 由此导致初始优化问题可能会过于复杂而难以求解. 为了简化初始优化问题, 首先应明确加固措施可能的序列, 然后根据每一个可能序列构建一个局部优化问题, 从而将初始优化问题划分为一组局部优化问题. 最终利用优化算法搜索每个局部优化问题的最优解集.

## 3.1 加固措施的可能序列

一个维修方案包含的加固措施数量应为 1~4 个. 换句话说, 在一个维修方案中每种加固措施最多被使用一次. 据此, 给出可能的维修方案如表 1 所示. 这里注意, 当采用寿命函数的某临界值为特定条件而初始寿命函数在一半给定寿命处还未下降到该临界值时, 仅包含更换结构的维修方案可被使用而其费用必然小于其他包含了更换结构的维修方案, 故表 1 中除 [4] 外含有更换结构的维修方案可不予考虑, 这时可能的维修方案减少为 8 个: [1], [2], [3], [4], [1 2], [1 3], [2 3] 和 [1 2 3].

表 1 可能的维修方案

Tab. 1 Possible maintenance scenarios

序号	维修方案 <sup>1)</sup>	序号	维修方案 <sup>1)</sup>
1	[1]	18	[1 4 3]
2	[2]	19	[2 3 4]
3	[3]	20	[2 4 1]
4	[4]	21	[2 4 3]
5	[1 2]	22	[3 4 1]
6	[1 3]	23	[3 4 2]
7	[1 4]	24	[4 1 2]
8	[2 3]	25	[4 1 3]
9	[2 4]	26	[4 2 3]
10	[3 4]	27	[1 2 3 4]
11	[4 1]	28	[1 2 4 3]
12	[4 2]	29	[1 3 4 2]
13	[4 3]	30	[1 4 2 3]
14	[1 2 3]	31	[4 1 2 3]
15	[1 2 4]	32	[2 4 1 3]
16	[1 3 4]	33	[3 4 1 2]
17	[1 4 2]	34	[2 3 4 1]

1) 维修方案中数字 1~4 分别表示延迟开锈、延缓锈蚀、加强性能和更换结构.

为了找出所有可能的加固措施序列,首先给出序列的约束条件如下:

当延迟开锈不是维修方案中第一个加固措施时,其只能紧跟在更换结构之后而不能紧跟在延缓锈蚀或加强性能之后.如维修方案[2 4 1]是可能的而[2 1 3]和[3 1 4]则不可能实现,因为:①若采用更换结构,意味着结构性能将恢复至初始状态故延迟开锈可以跟着使用;②若使用延缓锈蚀或加强性能,则说明钢筋已经锈蚀故延迟开锈将不起作用.

延缓锈蚀不能紧跟在加强性能之后.这是因为当使用加强性能时,加固材料被粘贴在混凝土截面受拉区和腹板区,而这里也是延缓锈蚀的工作区域.所以,诸如[1 3 2 4]之类的维修方案是无法实现的.

### 3.2 加固措施的费用

每种加固措施的费用应由3部分组成:材料费、施工费、桥梁关闭或部分关闭阻断交通引起的经济损失.由于缺乏可靠的统计数据,本文将不计入桥梁关闭引起的费用.但是,只要具有合理的统计数据来量化桥梁关闭费用,可以很方便地将其引入本文提出的分析方法中.对于延迟开锈,维修费用应是 $\Delta T_1$ 的单调递增函数.此外, $\Delta T_1$ 中较后期的时间段所需费用应高于相同长度的较前期的时间段所需费用,故其费用假定为

$$\Delta C_1 = a \cdot \Delta T_1^2 \quad (6)$$

式中: $\Delta C_1$ 为延迟开锈需要的费用; $a$ 为与加固材料和人工相关的费用系数.与延迟开锈类似,延缓锈蚀所需的费用应是 $\Delta T_2$ 的单调递增函数,可表示为

$$\Delta C_2 = b \cdot \Delta T_2^2 \quad (7)$$

式中: $\Delta C_2$ 为延缓锈蚀需要的费用; $b$ 为与加固材料和人工相关的费用系数.至于加强性能,本文将采用钢板作为加固材料,故其维修费用应为钢板单价、体积和规格的函数,可表示为

$$\Delta C_3 = ((V_f/t_f) P_f + (V_s/t_s) P_s) \times 1.05 \quad (8)$$

式中: $\Delta C_3$ 为加强性能需要的费用; $V_f$ 和 $V_s$ 分别为粘贴在混凝土截面受拉区和腹板区钢板的体积; $t_f$ 和 $t_s$ 分别为粘贴在混凝土截面受拉区和腹板区钢板的厚度; $P_f$ 和 $P_s$ 分别为粘贴在混凝土截面受拉区和腹板区钢板的单价;1.05为考虑施工费用的系数.更换结构所需的费用应为拆除费和新建费之和,可表示为

$$\Delta C_4 = \Delta C_a + \Delta C_b \quad (9)$$

式中: $\Delta C_4$ 为更换结构需要的费用; $\Delta C_a$ 为拆除所需费用; $\Delta C_b$ 为新建所需费用.最终,任意维修方案的总费用可表示为

$$C_M = \sum_{i=1}^4 \Delta C_i \cdot G(i) \quad (10)$$

式中: $C_M$ 为维修总费用; $\Delta C_i$ 为加固措施 $i$ 的费用; $G(i) = 1$ 或 $0$ ,分别表示当加固措施 $i$ 包含或未包含在维修方案中.

### 3.3 多目标优化问题

在3.1节,初始优化问题根据可能的维修方案被划分为一组局部优化问题.本节将针对一个明确的维修方案讨论如何生成其优化问题,其他维修方案可按照相同方法操作.以维修方案[1 2 4]为例,该方案包含5个决策变量,即 $T_1, \Delta T_1, T_2, \Delta T_2, T_4$ .优化目标为:①最大化整个结构中的最小构件弯曲可靠指标 $\beta_{f,\min}$ ;②最大化整个结构中的最小构件剪切可靠指标 $\beta_{s,\min}$ ;③最小化维修总费用 $C_M$ . $\beta_{f,\min}$ 和 $\beta_{s,\min}$ 的取值区间定为(3.5, 6.0),因为:①寿命期内可靠指标应始终高于临界值;②过高的可靠指标需要昂贵的维修费用.此外,在维修方案中除了第一项外其余加固措施都假定在其前一项的作用结束后才能实施.最终,维修方案[1 2 4]对应的优化问题如下.

决策变量为 $T_1, \Delta T_1, T_2, \Delta T_2, T_4$

实现目标为

$$\text{最大化 } \beta_{f,\min} \quad (11a)$$

$$\text{最大化 } \beta_{s,\min} \quad (11b)$$

$$\text{最小化 } C_M \quad (11c)$$

约束条件为

$$3.5 \leq \beta_{f,\min} \leq 6.0 \quad (11d)$$

$$3.5 \leq \beta_{s,\min} \leq 6.0 \quad (11e)$$

$$0 \leq T_1 \leq T_c \quad (11f)$$

$$T_c + \Delta T_1 \leq T_2 \leq T_{[\beta]} + \Delta T_1 \quad (11g)$$

$$T_2 + \Delta T_2 \leq T_4 \leq T_{[\beta]} + \Delta T_1 + \Delta T_2 \quad (11h)$$

对于其他维修方案,只需改变上述优化问题中的决策变量和约束条件而优化目标不变.优化算法方面,采用多目标遗传算法——NSGA-II<sup>[19]</sup>来搜索各个局部优化问题的最优解集.

## 4 实例

### 4.1 模型介绍

将建立的加固优化方法应用到一座地处上海的钢筋混凝土桥梁.该模型梁为一座 $3 \times 22$  m的三跨钢筋混凝土连续箱型梁桥<sup>[15]</sup>.由于地处沿海地区,空气中的氯离子含量可能较高,故环境条件考虑氯离子侵蚀引起的钢筋锈蚀.假设第2部分介绍的4

种加固措施均能采用,而每种加固措施的具体加固方式分别假定为硅烷处理、阴极保护、粘贴钢板和更换结构.式(6)~(9)中的费用系数取值见表 2.

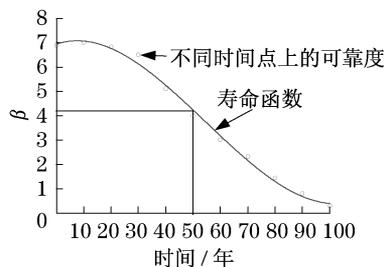
表 2 各种费用系数的取值

Tab.2 Values of cost coefficients

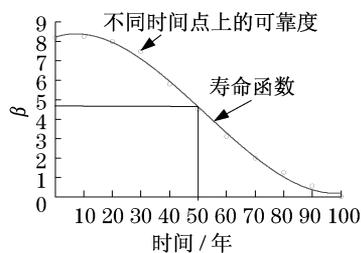
加固措施	费用系数	取值
硅烷处理	$a$	1 250 元·年 <sup>-2</sup>
阴极保护	$b$	1 500 元·年 <sup>-2</sup>
粘贴钢板	$P_f$	1 420 元·年 <sup>-2</sup>
	$P_s$	1 420 元·年 <sup>-2</sup>
更换结构	$\Delta C_a$	500 000 元
	$\Delta C_b$	2 000 000 元

#### 4.2 结果分析

模型梁被划分为每跨 7 个共 21 个构件,每个构件考虑弯曲和剪切破坏 2 种极限状态.利用 CBDAS 和拉丁超立方抽样的蒙特卡洛模拟法求解不同时间点上的构件可靠指标.样本点数量取为 10 000,给定设计使用寿命和计算子时间段分别为 100 年和 10 年.所有构件中的最小弯曲和剪切可靠指标将作为优化目标.图 2 给出了不同时间点上的最小构件弯曲和剪切可靠指标及最佳拟合寿命函数.可以看出,在使用寿命初期,由于钢筋还未锈蚀,寿命函数基本保持不变.在使用寿命末期,寿命函数几乎下降到零,因此有必要采取合适的加固措施使寿命函数维持在容许水平.



a 最小弯曲可靠指标



b 最小剪切可靠指标

图 2 不同时间点上的构件可靠指标及拟合的寿命函数

Fig.2 Point-in-time reliabilities and the fitted lifetime functions

图 3 给出了通过曲线拟合得到的反映钢板面积与寿命函数增量之间关系的闭合函数.

下面根据不同的特定条件来制定合适的维修方

案.这里共考虑 3 种特定条件:①可靠指标临界值设定为 3.5;②可用维修资金设定为 ¥1 800 000 元;③可靠指标临界值设定为 4.0.图 4 给出了维修方案[1 2 3]的优化解集.

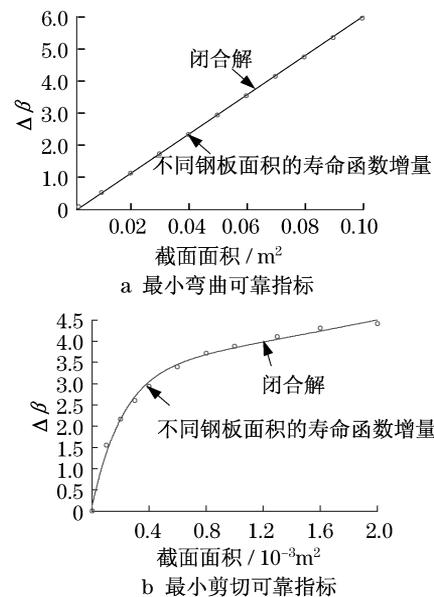


图 3 钢板面积与寿命函数增量的关系

Fig.3 Relationship between increment of lifetime function and sectional area of steel plate

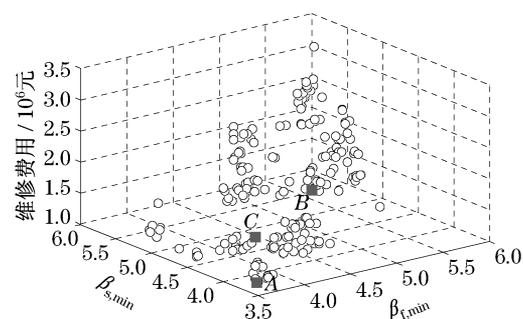
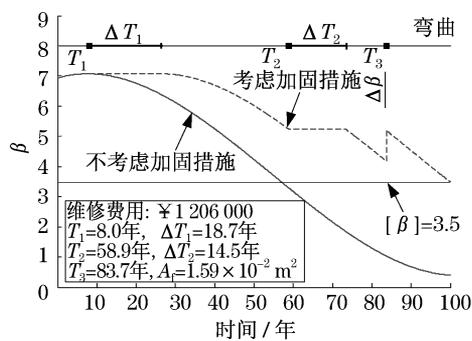


图 4 维修方案[1 2 3]的三维优化解集

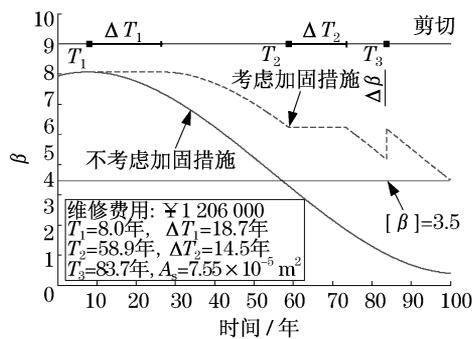
Fig.4 Three-dimensional Pareto-optimal set of maintenance scenario[1 2 3]

在第一个特定条件中,由于维修资金有限,桥梁业主仅希望利用尽可能少的费用维持结构始终在最低安全度之上,所以可靠指标临界值 3.5 被取为特定条件.注意到在成桥后 50 年(即给定寿命的一半)时弯曲和剪切可靠指标仍均大于 3.5,因此可能的维修方案将减小到 8 个.通过比较这 8 个维修方案的优化解集找出最佳解出现在维修方案[1 2 3]中,即图 4 中的点 A.图 5 给出了考虑优化解 A 时的弯曲和剪切可靠指标的演变过程.在该维修方案中,硅烷处理、阴极保护和粘贴钢板 3 项加固措施分别实施

于成桥后 8.0, 58.9 和 83.7 年, 保证整个寿命期内弯曲和剪切可靠指标始终大于 3.5.



a 最小弯曲可靠指标



b 最小剪切可靠指标

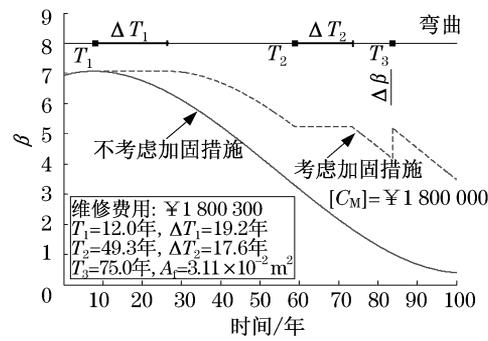
图 5 考虑优化解 A 时的弯曲和剪切可靠指标演变过程

Fig.5 History profile of flexure and shear reliabilities for Solution A

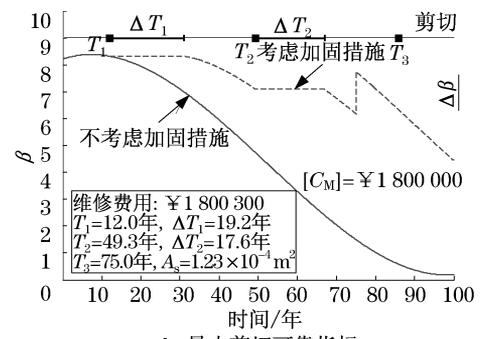
在第二个特定条件中, 假设拥有固定维修资金的桥梁业主希望在寿命期内通过维护得到尽可能好的结构性能. 因此, 设定可用维修资金为 ¥1 800 000, 希望找出效果最佳的维修方案. 这里由于更换结构的费用 (¥2 500 000) 已高于可用维修资金, 因此可能的维修方案应减小为 8 个. 比较这 8 个维修方案的优化解集找出最优解同样出现在维修方案 [1 2 3], 即图 4 中的点 B. 图 6 给出了考虑优化解 B 时的弯曲和剪切可靠指标的演变过程. 在该维修方案中, 3 种维修措施 (即硅烷处理、阴极保护和粘贴钢板) 分别应用于 12.0, 49.3 和 75.0 年. 在给定寿命末期, 经过加固措施后的弯曲和剪切可靠指标分别为 4.81 和 4.44. 同时, 该维修方案的总维修费用为 ¥1 800 300. 与优化解 A 相比, 优化解 B 可使结构性能处于更好状态但同时需要更高的维修费用.

在第三个特定条件中, 假设桥梁业主拥有充足的维修资金, 故希望维持结构性能在一个较高水准. 因此, 可靠指标临界值 4.0 取为特定条件, 通过优化分析找出费用最低的维修方案. 与第一个特定条件类似, 可能的维修方案应减小到 8 个. 通过比较这 8

个维修方案的优化解集找出最佳解出现在维修方案 [1 2 3] 中, 如图 4 中的点 C. 图 7 给出了考虑优化解



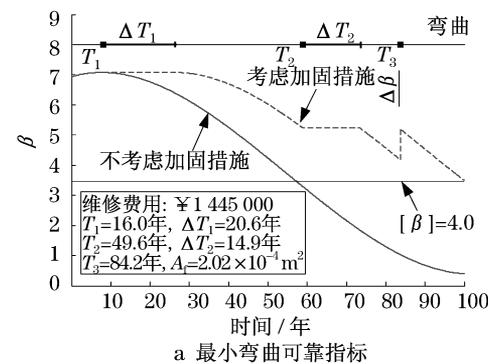
a 最小弯曲可靠指标



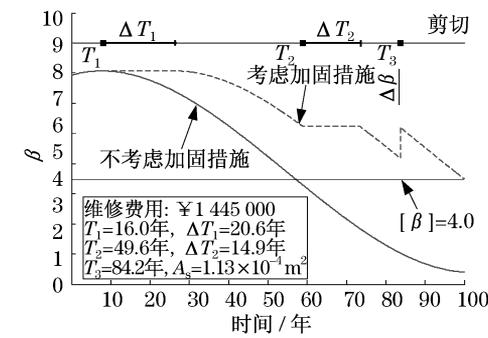
b 最小剪切可靠指标

图 6 考虑优化解 B 时的弯曲和剪切可靠指标演变过程

Fig.6 History profile of flexure and shear reliabilities for Solution B



a 最小弯曲可靠指标



b 最小剪切可靠指标

图 7 考虑优化解 C 时的弯曲和剪切可靠指标演变过程

Fig.7 History profile of flexure and shear reliabilities for Solution C

C 时的弯曲和剪切可靠指标的演变过程,其中 3 种维修措施分别实施于 16.0、49.6 和 84.2 年.同时,总维修费用为 ¥1 445 000 元。

## 5 结论

由于 CBDAS 可以考虑影响混凝土桥梁性能演变过程中的主要因素,因此求得的不同时间点上的可靠度以及由此拟合得到的寿命函数能够较好地反映寿命期内结构性能演变过程。

粘贴钢板对寿命函数的影响可利用求解寿命函数的方法来评估,因此钢筋混凝土桥梁常用的 4 种加固措施均可在加固优化过程中选用。

基于一组通过可能的维修方案得到的优化解集,桥梁决策者可根据不同的特定条件(如给定性能指标的临界值来寻找最经济的维修方案)来确定最合理的维修方案。

### 参考文献:

- [1] Frangopol D M. Life-cycle performance, management, and optimization of structural systems under uncertainty: accomplishments and challenges [J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2011, 7(6): 389.
- [2] Okasha N M, Frangopol D M. Novel approach for multicriteria optimization of life-cycle preventive and essential maintenance of deteriorating structures[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2010, 136(8): 1009.
- [3] Okasha N M, Frangopol D M. Time-variant redundancy of structure systems [J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2010, 6(1): 279.
- [4] Akgül F, Frangopol D M. Lifetime performance analysis of existing prestressed concrete bridge superstructures [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2004, 130(12): 1889.
- [5] Akgül F, Frangopol D M. Lifetime performance analysis of existing reinforced concrete bridges. I: theory[J]. *Journal of Infrastructure Systems*, 2005, 11(2): 122.
- [6] Akgül F, Frangopol D M. Lifetime performance analysis of existing reinforced concrete bridges. II: application[J]. *Journal of Infrastructure Systems*, 2005, 11(2): 129.
- [7] Akgül F, Frangopol D M. Computational platform for predicting lifetime system reliability profiles for different structure types in a net work[J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2004, 18(2): 92.
- [8] Frangopol D M, Lin K Y, Estes A C. Reliability of reinforced concrete girders under corrosion attack [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1997, 123(3): 286.
- [9] Neves L C, Frangopol D M. Condition, safety and cost profiles for deteriorating structures with emphasis on bridges [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2005, 89(2): 185.
- [10] Neves L C, Frangopol D M, Petcherdchoo A. Probabilistic lifetime-oriented multiobjective optimization of bridge maintenance: single maintenance type[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2006, 132(6): 991.
- [11] Neves L 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.
- [12] Ciampoli M, Ellingwood B R. Probabilistic methods for assessing current and future performance of concrete structures in nuclear power plants[J]. *Materials and Structures*, 2002, 34(245): 3.
- [13] Enright M P, Frangopol D M. Failure time prediction of deteriorating fail-safe structures [J]. *Journal of Structure Engineering*, 1998, 124(12): 1448.
- [14] Kong J S, Frangopol D M. Life-cycle reliability based maintenance cost optimization of deteriorating structures with emphasis on bridges [J]. *Journal of Structure Engineering*, 2003, 129(6): 818.
- [15] 田浩. 给定寿命期内混凝土桥梁性能演变分析[D]. 上海: 同济大学土木工程学院, 2009.  
TIAN Hao. Research on performance evolution of concrete bridges in given service life[D]. Shanghai: Tongji University. College of Civil Engineering, 2009.
- [16] Cornell C A. Bounds on the reliability of structural systems[J]. *Journal of Structural Division*, 1967, 93(ST1): 171.
- [17] Kiureghian A D, Lin H Z, Hwang S J. Second-order reliability approximations[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1987, 113(8): 1208.
- [18] McKay M, Conover W, Beckman R. Comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code [J]. *Technometrics*, 1979, 21(2): 239.
- [19] 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.