

# 基于长期检测的桥梁全寿命智能维养系统

叶智威<sup>1</sup>, 张佳鑫<sup>2</sup>, 谭海山<sup>1</sup>, 樊蕾<sup>1</sup>, 贺文<sup>1</sup>, 董优<sup>2\*</sup>, 吴旺林<sup>3</sup>

(1. 深圳市路桥建设集团有限公司, 广东 深圳 518001; 2. 香港理工大学 土木与环境工程学院, 香港 999077;  
3. 深圳诚科工程咨询有限公司, 广东 深圳 518001)

**摘要:** 中国针对桥梁维修养护系统, 主要以桥梁检测的数据为支撑进行状态排序, 将有限的预算进行分配。该策略专注于维修低性能桥梁, 集中在修复性养护而未过多关注预防性养护。从全寿命周期总成本考虑, 以修复为主的决策方法虽初期投入少, 但中后期资源消耗大。该文在现有公路桥梁养护的基础上, 发展出基于中国规范和检测数据, 修复和预防相结合的智能化维养系统。系统模型主要包括两大模块, 桥梁性能退化模型和智能维养决策模型。首先基于长期检测数据结合数理统计的动态马尔可夫(Markov)和威布尔(Weibull)模型对桥梁长期性能预测, 在此基础上结合预防性养护理念建立数学模型, 并采用群体智能算法进行优化求解。最终, 以深圳坂银通道上某预应力混凝土箱梁桥为研究对象, 采用实际桥梁检测数据对系统模型进行测试。结果表明: 与传统维养方法相比, 智能维养系统能节约10%的维养费用。

**关键词:** 桥梁维养系统; 智能维养; 结构退化; 马尔可夫模型; Weibull模型; 群体智能算法  
**中图分类号:** U445.7 **文献标志码:** A

## Intelligent Bridge Lifecycle Maintenance System Based on Long-Term Inspection

YE Zhiwei<sup>1</sup>, ZHANG Jiaxin<sup>2</sup>, TAN Haishan<sup>1</sup>, FAN Lei<sup>1</sup>, HE Wen<sup>1</sup>, DONG You<sup>2\*</sup>, WU Wanglin<sup>3</sup>

(1. Shenzhen Road & Bridge Group Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518000, China; 2. Department of Civil and Environmental Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hongkong 999077, China; 3. Shenzhen Chengke Engineering Consulting Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518001, China)

**Abstract:** The current bridge maintenance system in China primarily relies on bridge inspection data to prioritize the state of bridges and allocate a limited budget accordingly. This strategy focuses on repairing bridges with low performance, concentrating on restorative maintenance but ignoring preventive maintenance. In view of the total lifecycle cost, the repair-oriented method may require a lower initial investment but leads to significant resource consumption in the mid to late stages. Based on existing highway bridge maintenance systems, an intelligent maintenance system relying on Chinese standards and bridge inspection data and combining repair and prevention was developed. The system model mainly consisted of two modules: the bridge performance degradation model and the intelligent maintenance decision model. Firstly, the long-term performance of the bridge was predicted based on dynamic Markov and Weibull models using long-term inspection data and mathematical statistics. On this basis, a mathematical model following preventive maintenance concepts was established, and it was optimized and solved by using swarm intelligence algorithms. Finally, a prestressed concrete box girder bridge on the Banyin Passage in Shenzhen was studied, and the model was tested using actual bridge inspection data. The results show that compared with traditional maintenance methods, the intelligent maintenance system can reduce maintenance costs by up to 10%.

**Keywords:** bridge maintenance system; intelligent maintenance; structural degradation; Markov model; Weibull model; swarm intelligence algorithms

收稿日期: 2024-02-27 (修改稿)

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (编号: 52078448)

作者简介: 叶智威, 男, 硕士, 高级工程师. E-mail: 1006180561@qq.com

\*通信作者: 董优, 男, 副教授, 博士生导师. E-mail: you.dong@polyu.edu.hk

## 0 引言

桥梁结构性能退化是不可避免的,随着使用时间的增加,桥梁无法始终保持高服务水平。美国约1/4桥梁存在缺陷,未来5年交通网络投资缺口预计达5 495亿美元<sup>[1]</sup>。欧洲“BRIMS”项目<sup>[2]</sup>显示,超过3 800座铁路桥梁已服役100年,存在严重性能缺陷。中国虽无完整统计,但80万座公路桥中20%建于20世纪<sup>[3]</sup>,多数表现性能退化。桥梁退化因素包括养护不当、施工问题及早期设计不足。因此,了解退化机理,准确评估性能并预测趋势,对桥梁管理至关重要。桥梁退化预测依赖于统计模型和物理模型。统计模型包括确定性曲线模型<sup>[4]</sup>、随机模型<sup>[5]</sup>、人工智能模型<sup>[6]</sup>,物理模型则包括加速劣化试验<sup>[7]</sup>和有限元模拟<sup>[8]</sup>。中国马尔可夫模型<sup>[9-11]</sup>及Weibull模型<sup>[12]</sup>的研究显示潜力,但需进一步发展。

中国桥梁维养依赖专家决策,通过定期检测和性能排序选择维修桥梁。但此方法受主观影响,且忽视全寿命周期。相比之下,欧美更强调预防性养护<sup>[13]</sup>,定期检查和维护以预防问题。智能维养系统,结合修复性与预防性养护,对桥梁维护至关重要。桥梁管理系统如美国的Pontis<sup>[14]</sup>、Bridgit<sup>[15]</sup>,日本的J-BMS<sup>[7]</sup>、丹麦的DANBRO<sup>[16]</sup>以及中国的系统<sup>[17-18]</sup>各有特点,但在维养决策上存在差异。然而,在当今的智能化养护背景下,系统智能化逐渐引起国内外业主和研究人员的重视,应用遗传算法和POS粒子群优化算法的智能系统和模型逐渐被发展和推广。

本文将修复性和预防性养护相结合的维养理念引入智能维养系统中,结合长期桥梁检测数据,采用动态马尔可夫模型和Weibull模型对桥梁退化规律进行描述,而后结合运筹学理论进行维养规划建模,最后通过群体智能算法对数学模型求解得到维养规划方案,并在深圳坂银通道桥梁上实施验证。本文调研了国内外的桥梁退化模型和维养决策模型,提出基于大数据的动态马尔可夫模型、Weibull模型的桥梁性能演化模型和基于群体智能算法的维养决策模型;并将建立的桥梁智能维养系统运用于实际桥梁,包括性能预测部分与智能决策部分;最后,以深圳坂银通道上某预应力混凝土箱梁桥做对比案例,给出全寿命期维养结果,并与传统维养规划方法的性能和费用进行对比。

## 1 桥梁动态退化模型

现有研究多采用单一的状态概率转移矩阵来描述构件在其生命周期内的退化行为,这种方法可能导致较大的预测误差。而本研究推荐采用动态变化的马尔可夫模型,以适应环境变化、交通情况和材料老化等因素的影响,提高模型的适应性和预测准确性。同时,提出了需要进一步建立Weibull失效概率模型与结构状态退化之间的关系式,这一研究在土木工程中尚处于起步阶段。此外,本研究还推导了马尔可夫模型、Weibull模型与多项式回归模型之间的转化公式,实现研究中各模型之间对比与转化。

### 1.1 马尔可夫退化模型

#### 1.1.1 经典马尔可夫模型

马尔可夫模型是一种经验统计模型。由苏联科学家马尔可夫提出。其基本假定为:结构或构件未来的状态只与当前的状态有关,而与历史状态无关。马尔可夫链是一种离散状态的马尔可夫模型,其表示桥梁结构或构件的状态是离散的,对应于《公路桥梁技术状况评定标准》(JTG/T H21—2011)的5类离散状态。

马尔可夫过程描述的是规律性的概率变化模型,其用状态概率转移矩阵描述了当构件或部件经历一个规定周期的作用后,由当前状态转移到另一个状态的概率,方程表示为 $P(S_{t+1}|S_t)$ 。状态的全部取值组成的集合称为状态空间。根据中国规范,状态空间为 $\{1, 2, 3, 4, 5\}$ 。由于桥梁劣化相对缓慢,其有较大概率 $P_{ii}$ 保持当前状态,小概率 $P_{ij}$ 劣化下一个状态。针对桥梁,一般采用状态单阶跳跃的马尔可夫矩阵,如图1所示。

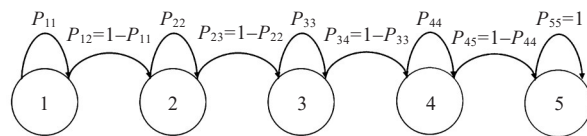


图1 马尔可夫链状态概率转移示意图

Figure 1 State probability transition of Markov chain

为了方便计算,采用矩阵的形式,一个周期下的概率转移矩阵 $T$ 可以表示为:

$$T = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \end{matrix} & \begin{bmatrix} P_{11} & 1-P_{11} & & & \\ & P_{22} & 1-P_{22} & & \\ & & P_{33} & 1-P_{33} & \\ & & & P_{44} & 1-P_{44} \\ & & & & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (1)$$

马尔可夫过程矩阵为方阵,其中矩阵行号代表当前构件的状态,矩阵列号代表构件经历一个周期后的状态,行列在矩阵中的对应值代表概率,即状态的转移概率。由式(1)可知:对于马尔可夫模型,确定具体构件的性能劣化曲线需要4个基本参数 $P_{11}$ 、 $P_{22}$ 、 $P_{33}$ 、 $P_{44}$ 。这4个参数决定了具体构件的一般劣化规律,对于特定环境中的构件,还需要对这4参数进行修正。

### 1.1.2 动态多段式马尔可夫退化模型

由于材料性能与服役龄期相关,桥梁状态概率转移矩阵需要针对龄期进行修正。对于多段式马尔可夫模型,首先对桥梁进行不同的龄期组划分,再对每一组中的所有桥梁状态进行多项式回归来拟合一般退化规律曲线,形式为:

$$Y_t = \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 t^2 + \beta_3 t^3 \quad (2)$$

式中: $Y_t$ 为结构在 $t$ 时刻的状态, $\beta_0$ 、 $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 与 $\beta_3$ 为待定的回归系数。

在得到拟合曲线后,通过最小化由马尔可夫链的条件评级的理论期望值 $E(t, P)$ 与拟合曲线的状态值 $\hat{Y}_t$ 之间的差异,来计算矩阵的状态转移概率。需要优化的目标函数如式(3)所示:

$$\begin{aligned} \min \sum_{i=1}^N |\hat{Y}_i - E(t, P)| \\ \text{Subject to } 0 \leq P_{ij} \leq 1 \\ \text{and } \sum_{j=1}^k P_{ij} = 1, \text{ for } i, j = 1, 2, \dots, k \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $N$ 为龄期时间分段,如每8年为一段进行回归; $P_{ij}$ 为状态 $i$ 到状态 $j$ 的概率; $E(t, P)$ 为通过状态概率转移矩阵计算出来的状态期望值,假定在该龄期分段内,桥梁构件初始状态为 $P_0$ ,定义的状态空间对应的数值为 $S = [1, 2, 3, 4, 5]$ ,则 $E(t, P)$ 计算公式如式(4)所示:

$$E(t, P) = P_0 T' S \quad (4)$$

式中:状态概率转移矩阵包含4个未知参数,需要通过最小化目标函数方程来进行优化,可直接采用梯

度下降法进行计算。例如,假定初始参数为 $[P_{11} = 0.9, P_{22} = 0.9, P_{33} = 0.9, P_{44} = 0.9]$ ,计算其欧式距离 $D_{\text{loss}}$ 值,如式(5)所示:

$$D_{\text{loss}} = \|\hat{Y}_t - P_0 T' S\|_2 \quad (5)$$

对每个初始参数给定一个微小的增量 $dx = \sqrt[1/3]{e/2}$ ,计算 $D_{\text{loss}}$ 值的增量,从而得到关于loss方程的梯度:

$$\nabla D_{\text{loss}} = \|\hat{Y}_t - P_0 T' (P_{ii} + dx) S\|_2 - D_{\text{loss}} \quad (6)$$

利用梯度对初始的参数 $r_i$ 进行梯度更新,学习率取 $1 \times 10^{-3}$ ,最终得到最优解:

$$r_i = r_i - \eta \nabla D_{\text{loss}} \quad (7)$$

## 1.2 Weibull退化模型

威布尔(Weibull)退化模型属于持续时间模型,它是对桥梁组件保持在特定条件状态的时间进行拟合的模型。在此类模型中,构件直到劣化到下一个状态所需的持续时间被视为随机变量。代替了以状态本身为模型的马尔可夫模型。持续时间模型可以更好地模拟劣化过程的随机性质,考虑早期确定模型中无法涵盖的时间依赖性。持续时间模型相较于马尔可夫模型,可以应对数据缺失的情况,使得该模型应用面更广。桥梁状况等级数据不可避免地存在大量缺失,第1种常见的缺失是左缺失观测。例如,一个桥梁构件,在1992年观测期开始,状况等级为2,中间一直没观测,直到1997年桥梁检测发现桥梁状态为3,在这种情况下,无法推测构件维持状态2的时间;第2种常见缺失为右缺失观测。由于维修养护操作,桥梁组件的状态等级可能会在其使用寿命期间增加。这代表了自然劣化过程的过早中断。例如,观察到条件等级3的构件由于维护而增加到1,无法得知在没有维护的情况下桥梁组件保持等级3的时间。

因此,确定性模型与马尔可夫模型都存在一定的数据匹配问题,而持续时间模型有更好的数据适应能力。假定桥梁维持某一状态的时间为 $T_i$ ,由构件不同的持续时间可以构成累积概率密度分布CDF,对于时间 $t$ 时刻,构件劣化至下一状态的概率可以由累积概率密度方程给出,如式(8)所示:

$$S(t) = 1 - F(t) = p(T_i > t) \quad (8)$$

式中: $F(t)$ 为失效概率; $S(t)$ 为维持该状态的概率。

该概率方程为一个单调递减方程,当 $t=0$ 时, $S(t)$ 概率为1,当 $t=\infty$ 时, $S(t)$ 概率为0。当构件已维



持当前状态时间为 $t$ ,在下个时间段 $\Delta t$ 内,失效的概率为:

$$l(t, \Delta t) = P(t \leq T_i \leq t + \Delta t | T_i \geq t) \quad (9)$$

当 $\Delta t$ 趋于0时,可得到 $t$ 时刻失效概率密度方程:

$$h(t) = \frac{\lim_{\Delta t \rightarrow 0} (P(t \leq T_i \leq t + \Delta t) | T_i \geq t)}{\Delta t} = -\frac{d}{dt} \ln S(t) \quad (10)$$

通常,构件在某一状态的维持时间分布不是正态分布。采用Weibull分布可以更好地与实际数据拟合,故 $S(t)$ 的计算公式为:

$$S(t) = e^{-(t/\lambda)^\gamma} \quad (11)$$

式中: $\lambda$ 为尺度参数; $\gamma$ 为形状参数。

对从0开始到当前时段 $t$ 的失效概率密度函数积分,可以得与构件维持当前状态的概率关系式:

$$H(t) = \int_0^t h(x) dx = -\ln S(t) \quad (12)$$

## 2 基于群体智能算法的维养决策模型

本文提出的方法解决了安全与经济之间的矛盾,即在保障结构安全的前提下,寻找维护成本最低的方案。与传统的数学优化方法相比,遗传算法不依赖于梯度信息,能够处理离散值优化问题,并通过模拟自然进化过程搜索最优解。这种算法具有强大的泛化能力,可以并行运算评估空间中的多个解,提高优化效率。此外,遗传算法的启发式随机搜索特性可以引导搜索过程向更优化的解区域移动,这种方法在桥梁维养决策中的应用能够有效提升资源的利用效率和决策的科学性。桥梁维养模型需要解决结构安全(维护效应)和经济代价(维护成本)之间的矛盾,即需要寻找最优的维护方案,在保证结构安全适用前提下,尽可能提高桥梁综合性能,使维护费用最低。整体数学模型如下:

$$\min f(x, t), \text{ s.t. } \begin{cases} g(x, t) + Y(t) \leq b \\ x_i \in \{0, 1\}, x = [x_1, x_2, \dots, x_m]^T \end{cases} \quad (13)$$

式中: $x$ 为维养决策的 $\{0, 1\}$ 变量储存向量。向量长度 $m = \text{维养手段} \times \text{维养周期}$ ;  $f(x, t)$ 为维养费用函数; $g(x, t)$ 为维养效应函数; $Y(t)$ 为桥梁退化模型。

桥梁维养的优化问题,区别于传统的数学优化,

在于所有变量都是离散值,优化问题本身不存在梯度,使得古典优化算法基于一个单一的度量函数(目标函数)的梯度优化无法运用。而遗传算法不依赖于梯度信息,而是通过模拟自然进化过程来搜索最优解(Optimal Solution),它利用某种编码技术,将维养动作与桥梁状态编辑成染色体的数字串,模拟由这些串组成的群体的进化过程。遗传算法通过有组织的、随机的信息交换来重新组合那些适应性好的串,生成新的串群体。相比其他算法,它具有:①泛化能力强,可表示任意的离散值,且与量纲无关;②群体搜索特性,可采用并行运算对空间中的多个解进行评估,优化效率高;③内在启发式随机搜索特性,遗传算法采用概率的变迁规则来指导它的搜索方向。由概率的引导,使搜索过程朝着搜索空间的更优化的解区域移动。

遗传算法首先从随机解这一群体中确定初始值。不同于常规检索技术,常规检索只寻找单一解。遗传算法群体包含许多个体(染色体),每个个体又包含许多基因。每一代中个体的数量称作群体大小,每一个体代表一个给定问题的参选解。每一个体用一串二进制字符串表示。在每一代进化过程中,对生成的每一个体的适应性用目标函数进行评估。后代的形成是靠交叉作用合并当前一代中两个体或靠突变作用改变后代的一些基因,从而产生下一代。在自然选择的过程中,较高适应性的个体具有较大的可能成为新一代的一部分。这样不断进化,最终得到最优解。具体算法流程见图2。

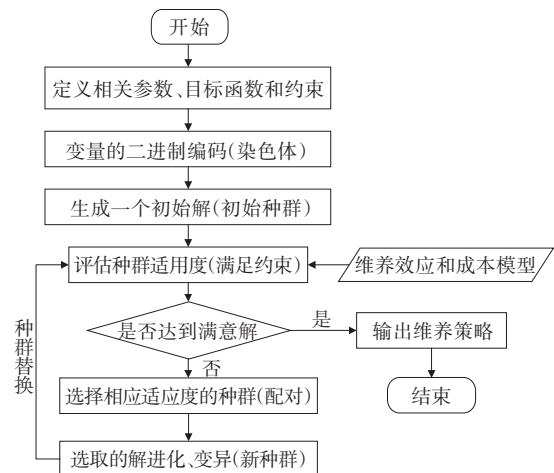


图2 遗传算法流程图

Figure 2 Genetic algorithm flowchart

遗传算法在桥梁智能维养决策中,体现在其能够在众多潜在的维养方案中搜索出最优解。这一过程从随机解的种群中确定初始值开始,与常规检索只寻求单一解的方法不同,遗传算法在每次迭代中评估多个候选解的适应性。具体而言,这些候选解或“个体”由二进制字符串表示,代表桥梁维养的不同策略。通过交叉和变异操作产生后代,使得适应性较高的个体有更大的机会遗传至下一代。在自然选择的过程中,这种算法不断迭代,最终收敛于最优维养策略。结合桥梁维养目标,遗传算法的输入是桥梁性能的退化模型以及维养成本,输出则是在满足安全性和经济性约束条件下的最优维养策略。

二进制编码如表 1 所示。每种维护措施对应个体中的每一组基因 6 位码。

表 1 遗传算法编码

Table 1 Genetic algorithm encoding			个体 (染色体)
桥龄	维护措施	编码/遗传码	
1	不加固、不维修	000000	
2	不加固、不维修	000001	
3	不加固、不维修	000010	
4	不加固、不维修	000011	
...	...	...	
T	灌浆法	111101	

### 3 案例分析

#### 3.1 退化模型的建立

退化模型的建立需要稳定数据集用于建立稳定退化关系,以前期工作积累和文献调研建立包含共计 22 600 座桥梁的数据集,并选取其中相同工况和服役年限的桥梁建立性能演化集合,如表 2 所示。

表 2 桥梁自然退化过程统计表

Table 2 Statistics of natural bridge degradation

桥梁 龄期	当前平均 状态值	桥梁 龄期	当前平均 状态值	桥梁 龄期	当前平均 状态值	桥梁 龄期	当前平均 状态值	桥梁 龄期	当前平均 状态值	桥梁 龄期	当前平均 状态值
1	1.000 0	6	1.508 7	11	1.918 0	16	2.125 8	21	2.397 1	26	2.534 0
2	1.000 0	7	1.565 3	12	1.942 1	17	2.149 4	22	2.403 0	27	2.549 4
3	1.083 4	8	1.569 6	13	2.019 1	18	2.187 4	23	2.461 7	28	2.601 2
4	1.282 2	9	1.800 2	14	2.094 9	19	2.203 3	24	2.521 1	29	2.670 9
5	1.432 3	10	1.886 1	15	2.097 7	20	2.334 5	25	2.526 2	30	2.780 0

对该数据集内桥梁状态衰减初步进行三次多项式[式(2)]拟合,表示桥梁在自然状态下劣化,如图 3 所示。

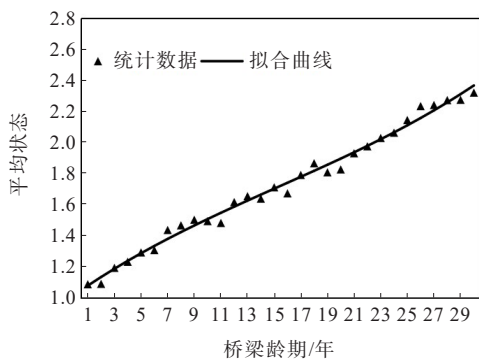


图 3 桥梁性能拟合曲线

Figure 3 Fitting curve of bridge performance

由式(1)~(7)计算动态多段式得马尔可夫退化模型(图 4)。本算例以 10 年为时间分段,对统计数据

进行三段式划分,计算出 3 组马尔可夫状态概率转移矩阵,如表 3 所示。注意这里对矩阵中的 4 个未知量进行约束,由于结构状态转移是一个缓慢的过程,通常对这 4 个参数约束至范围[0.9,1]。

表 3 动态多段式马尔可夫状态概率转移矩阵

Table 3 Dynamic multi-stage Markov state probability transition matrix

参数	状态概率转移矩阵 T		
	1~10 年	11~20 年	21~30 年
$P_{11}$	0.904 4	0.934 9	0.950 7
$P_{22}$	0.943 2	0.933 8	0.959 9
$P_{33}$	0.990 1	0.975 6	0.973 4
$P_{44}$	0.954 1	0.956 3	0.958 6

Weibull 退化模型及模型参数如图 5、表 4 所示。由图 5 与表 4 明显发现:没有增加参数均匀分布的优

化往往会导致4个退化公式差异巨大,使得桥梁在全寿命周期内某时间段陷于特定状态。而增加参数均匀分布能避免该现象的发生。

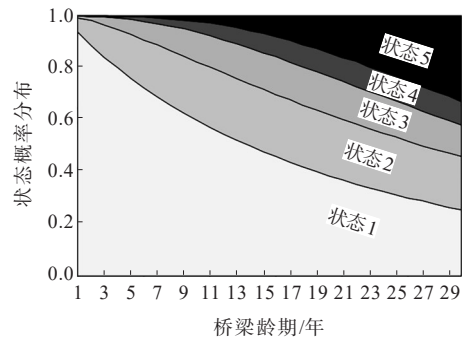


图4 马尔可夫退化模型  
Figure 4 Markov degradation model

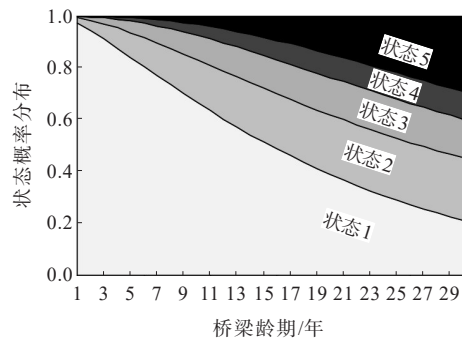


图5 Weibull退化模型  
Figure 5 Weibull degradation model

表4 Weibull模型参数表

Table 4 Weibull model parameters

状态转移	无4参数	预期维持 状态年限 (50% 概率 值)/年		预期维持 状态年限 (50% 概 率值)/年
		含4参数	含4参数	
State1→State2	$\lambda_1=9.313\ 7$ $\gamma_1=1.039\ 3$	6.55	$\lambda_1=23.125\ 3$ $\gamma_1=0.603\ 8$	12.60
State2→State3	$\lambda_2=26.498\ 9$ $\gamma_2=1.455\ 2$	20.60	$\lambda_2=23.786\ 9$ $\gamma_2=0.601\ 6$	12.93
State3→State4	$\lambda_3=59.822\ 8$ $\gamma_3=3.734\ 8$	54.23	$\lambda_3=24.401\ 3$ $\gamma_3=0.720\ 2$	14.67
State4→State5	$\lambda_4=65.559\ 3$ $\gamma_4=6.874\ 9$	62.16	$\lambda_4=24.478\ 0$ $\gamma_4=0.843\ 4$	15.85

3.2 维养方案优化

以深圳坂银通道上某预应力混凝土箱梁桥为研究对象,进行维养方案优化,该桥为市政桥梁,全长

505.0 m。桥面全宽13.4 m,桥面横向布置为0.95 m(花槽+护栏)+11.5 m(行车道)+0.95 m(花槽+护栏)。上部结构跨径组合为 $[(1\times 25)+(40+57+40)+(3\times 30)+(3\times 30)+(31+35+31)+(2\times 30)]$  m,其中第2联采用连续钢箱梁,其余联采用预应力混凝土现浇连续箱梁;下部结构采用柱式墩、重力式桥台;桥面采用沥青混凝土铺装,伸缩缝采用模数式伸缩缝。桥梁概貌照如图6所示。



图6 桥梁现场图  
Figure 6 Bridge field image

该桥梁建成以来经过多次检测,于2016年对上部结构进行了体外预应力加固与纤维加固。目前桥梁状态如表5所示。

表5 坂银通道上某预应力混凝土箱梁桥技术状况评定

Table 5 Technical condition assessment of a prestressed concrete box girder bridge on Banyin passage

桥梁部位	技术状况得分		评定等级		原因分析
	2016年	2019年	2016年	2019年	
上部结构	85.06	80.87	2	2	趋于稳定
下部结构	88.85	93.14	2	2	趋于稳定
桥面系	79.81	79.83	3	3	趋于稳定
全桥	85.50	85.57	2	2	趋于稳定

该桥梁建成以来养护较好,为了维持现有桥梁的服役性能,自建成后对上部结构进行了加固,根据桥梁部件划分情况进行部件权重重分配,结合权重和维修养护动作效用表(表6、7),对桥梁30年内维养养护方案进行优化。

采用遗传算法对维修养护方案进行智能优化,分别展示对桥梁上部结构、下部结构、桥面系的养护以及形成对桥梁整体的维修养护方案,结果如图7所示,最终总维修养护费用90万元,与达到阈值直接加固花费的100万元相比,费用节省10%。

表 6 桥梁权重调整表

Table 6 Bridge weight adjustment

部位	部件名称	重新分配后权重
上部结构	上部承重构件	0.70
	上部一般构件	0.18
	支座	0.12
下部结构	桥墩	0.34
	桥台	0.34
	墩台基础	0.32
桥面系	桥面铺装	0.46
	伸缩缝装置	0.30
	栏杆、护栏	0.12
	排水系统	0.12

表 7 维修养护动作效用表

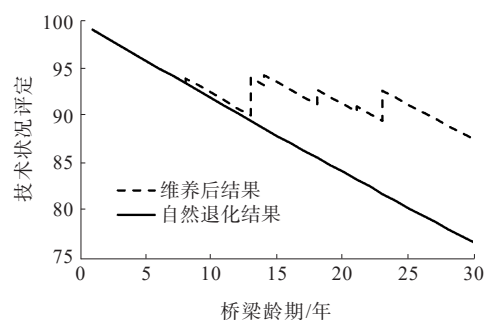
Table 7 Maintenance action efficacy

养护方法	养护效用		养护成本 (与更换该构件 费用比值)
	是否降低劣化速率	是否提升性能	
动作 1	降低劣化速率	不提升性能	0.01
动作 2	降低劣化速率	略微提升性能	0.05
动作 3	显著降低劣化速率	提升性能	0.10
动作 4	显著降低劣化速率	显著提升性能	0.50
动作 5	恢复至初始速率	恢复至初始性能	1.00

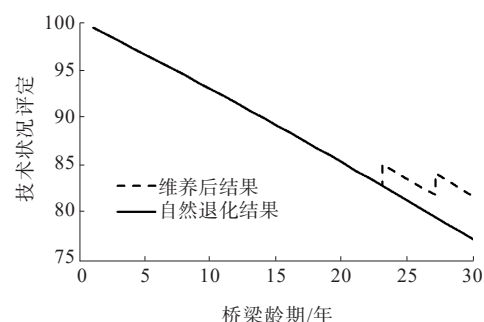
## 4 结果与讨论

基于国内外桥梁检测数据库开发了一套桥梁智能维养决策辅助系统,其包含两大模块功能,首先,依据检测数据建立了桥梁各个构件长期性能演化模型,提出了 3 种桥梁性能劣化表达式:多项式回归模型、动态多段式马尔可夫模型、状态持续时间概率 Weibull 模型;其次,采用遗传算法建立了智能维养决策系统,基于性能演化模型,遗传算法可以在多约束情况下,求出桥梁全寿命周期内最优维养策略。最后以深圳坂银通道上某预应力混凝土箱梁桥为研究对象,进行全生命周期的维养策略规划。主要结论如下:

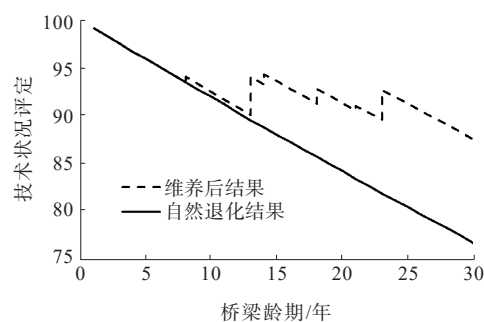
(1) 建立动态马尔可夫模型和 Weibull 模型用于桥梁性能预测,并通过引入回归参数对预测模型进行修正,有效缓解长期预测中桥梁陷于特定状态的问题。



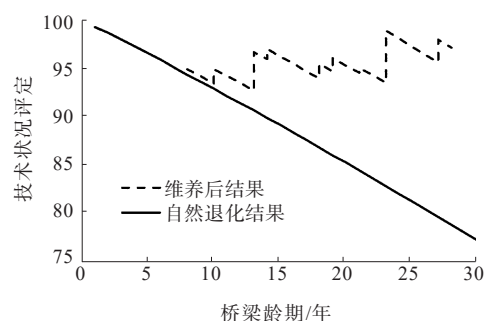
(a) 上部结构



(b) 下部结构



(c) 桥面系



(d) 桥梁整体

图 7 维养决策结果示意图

Figure 7 Maintenance decision result

(2) 提出基于遗传算法的桥梁动态维养决策优化模型,解决了桥梁全寿命周期中用于性能提升时产生经济损失的矛盾问题,得到最优维养策略。

(3) 以深圳坂银通道上某预应力混凝土箱梁桥



为研究对象,对其全生命周期内维养策略进行规划,在保证桥梁性能的前提下采用最经济维养策略,结果表明本文提出方法能节省约10%的维养费用。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] VICTOR, ROBERT, GEOFFREY Baskir, et al. Report card for America's infrastructure, American society of civil engineers[R]. US: American Society of Civil Engineers, 2013.
- [2] Bell, Brian, Network Rail. European railway bridge demography[J]. European FP 6, 2004.
- [3] 任成飞. 桥梁巡检养护管理系统的开发与大数据分析[D]. 西安: 长安大学, 2017.
- REN Chengfei. Development and big data analysis of bridge inspection and maintenance management system [D]. Xi'an: Chang'an University, 2017.
- [4] MORCOUS G. Case-based reasoning for modeling bridge deterioration[D]. Canada: Concordia University, 2000.
- [5] MORCOUS G, LOUNIS Z, MIRZA M S. Identification of environmental categories for Markovian deterioration models of bridge decks[J]. Journal of Bridge Engineering, 2003, 8(6): 353-361.
- [6] HUANG Y H. Artificial neural network model of bridge deterioration[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2010, 24(6): 597-602.
- [7] Miyamoto A. Development of a bridge management system (J-BMS) in Japan[C]//US Workshop on Life-Cycle Cost Analysis & Design of Civil Infrastructure Systems, 2001.
- [8] BIONDINI F, VERGANI M. Deteriorating beam finite element for nonlinear analysis of concrete structures under corrosion[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2015, 11(4): 519-532.
- [9] 周志星. 混凝土梁桥结构技术状况退化预测研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2016.
- ZHOU Zhixing. Study on condition of degradation prediction research of concrete bridge elements[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2016.
- [10] 张阳, 黄亦雅, 任成飞, 等. 基于检查评定大数据的桥梁技术状况多阶段退化模型[J]. 公路, 2018, 63(2): 87-91.
- ZHANG Yang, HUANG Yiya, REN Chengfei, et al. Multi-stage degradation model of bridge technical condition based on inspection and evaluation big data[J]. Highway, 2018, 63(2): 87-91.
- [11] 汤怀胜. 桥梁技术状况评估、预测及管理系统开发研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2008.
- TANG Huaisheng. Bridge technical condition assessment, prediction and system development[D]. Changsha: Hunan University, 2008.
- [12] 岑代鲜. 桥梁使用寿命预测研究[J]. 公路交通技术, 2010, 26(4): 80-84.
- CEN Daixian. Research development of service life of bridges[J]. Technology of Highway and Transport, 2010, 26(4): 80-84.
- [13] 邹伟. 公路路面养护资金动态分配优化研究[J]. 中外公路, 2023, 43(1): 247-252.
- ZOU Yi. Study on dynamic allocation optimization of highway pavement maintenance funds[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(1): 247-252.
- [14] THOMPSON P D, SMALL E P, JOHNSON M, et al. The pontis bridge management system[J]. Structural Engineering International, 1998, 8(4): 303-308.
- [15] HAWK H, SMALL E P. The Bridgit bridge management system[J]. Structural Engineering International, 1998, 8(4): 309-314.
- [16] HENRIKSEN A. Bridge management-routine maintenance: recent experience with the routine management module in the danbro bridge management system[C]//Proceedings of the 8th International Bridge Management Conference. Denver: 1999.
- [17] 贺志勇, 戴少平, 袁辉明. CBMS在高速公路桥涵养护管理中的应用[J]. 中外公路, 2010, 30(1): 194-196.
- HE Zhiyong, DAI Shaoping, YUAN Huiming. Application of CBMS in maintenance management of expressway bridges and culverts[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2010, 30(1): 194-196.
- [18] 王代君, 周天图, 傅俊敏, 等. 大型桥梁健康监测系统多源异构数据集集成研究[J]. 中外公路, 2023, 43(2): 100-106.
- WANG Daijun, ZHOU Tiantu, FU Junmin, et al. Research on multi-source and heterogeneous data integration of large bridge health monitoring system[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(2): 100-106.