

基于贝叶斯的预应力混凝土桥梁可靠度评估

丁千夏, 李海彪, 潘丁菊

[华蓝设计(集团)有限公司, 广西 南宁 530012]

摘要: 在侵蚀环境下, 桥梁受多种因素的耦合作用, 抗力不断退化且存在时间变异性, 其本质属于非平稳随机过程, 若采用统一标准化的抗力退化模型将无法准确描述抗力退化过程中的不确定性。为探究在侵蚀环境下预应力钢筋混凝土桥梁的性能退化情况, 对其安全性能进行准确评估, 将已有的氯离子侵蚀模型、抗力退化计算模型、荷载效应时变模型视为先验知识, 把桥梁检测数据作为观测数据, 利用贝叶斯神经网络来减少先验知识中模型及其参数的不确定性, 提高侵蚀环境下预应力钢筋混凝土桥梁可靠度评估的精度和可信度。研究表明, 利用贝叶斯神经网络更新氯离子侵蚀模型、抗力退化计算模型、荷载效应时变模型后, 可以更准确地预测预应力混凝土桥梁在侵蚀环境下的可靠度及剩余使用寿命。

关键词: 预应力钢筋混凝土; 氯离子; 可靠性分析; 贝叶斯

中图分类号: U441⁺.4

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)02-0042-05

Assessment on Reliability of Prestressed Concrete Bridges Based on Bayesian

DING Qianxia, LI Haibiao, PAN Dingju

[Hualan Design (Group) Co., Ltd., Nanning 530012, China]

Abstract: In an erosive environment, the bridges are subject to the coupled effect of multiple factors, with their resistance constantly deteriorating and showing temporal variability, whose essences belong to a non-stationary stochastic process. If a unified and standardized resistance degradation model is adopted, it will be impossible to accurately describe the uncertainty during the resistance degradation process. To investigate the performance degradation of prestressed reinforced concrete bridges in erosive environment, the safety performance of bridges are accurately evaluated. The existing chloride ion erosion models, resistance degradation calculation models, and time-varying load effect models are considered as prior knowledge, and the bridge detection data are used as observation data. Bayesian neural networks are used to reduce the uncertainty of models and their parameters in prior knowledge, and to improve the accuracy and credibility of reliability evaluation of prestressed reinforced concrete bridges in erosive environments. The research results indicate that after updating the chloride ion erosion model, resistance degradation calculation model and load effect time-varying model by Bayesian neural networks, the reliability and remaining service life of prestressed concrete bridges in erosion environments can be predicted more accurately.

Keywords: prestressed reinforced concrete; chloride ion; reliability analysis; Bayesian

0 引言

桥梁在服役过程中常面临多种环境侵蚀与疲劳损伤的耦合作用, 进而引发材料劣化、结构耐久性下降和承载力衰退, 并可能诱发重大安全风险。尤其在沿海地区、频繁使用除冰盐的寒冷区域, 桥梁结构受氯离子侵蚀的问题尤为突出。因此, 探究预应力

混凝土梁桥在侵蚀环境下的时变承载力演化规律具有重要意义, 其研究成果可为结构全寿命设计及安全预警分级提供理论支撑。基于此, 如何科学评估在役预应力混凝土桥梁的安全性能, 并精准预测其剩余服役期内的可靠性, 已成为全球桥梁工程领域的研究热点。

学术界已针对导致预应力混凝土结构承载力退化的关键因素开展了大量研究, 积累了丰富的研究成果, 内容主要涉及混凝土碳化、氯离子侵蚀、硫酸盐侵蚀、冻融循环、钢筋锈蚀等劣化现象的作用机理及工程预测模型^[1-6]。目前, 关于预应力混凝土桥梁

收稿日期: 2025-09-02

作者简介: 丁千夏(1991—), 女, 硕士, 工程师, 从事桥梁设计工作。

通信作者: 李海彪(1992—), 男, 学士, 工程师, 从事桥梁设计工作。电子邮箱: 804060049@qq.com

时变承载力的研究,多基于上述成果预测其全寿命周期内的承载力演化^[7-8]。Mori 等^[9]提出采用幂函数量化抗力退化系数;Wang 等^[10]则引入逆高斯分布,描述结构的性能退化,把不确定的抗力退化过程量化成确定的抗力衰减曲线。

然而,在实际工程中,桥梁抗力退化受到多种因素的综合作用,且各因素间存在复杂耦合效应,其演化过程本质上属于非平稳随机过程,因此存在显著的不确定性。若单纯依靠理论公式计算桥梁可靠度指标并预测其剩余寿命,结果往往存在偏差。为此,本文以氯离子侵蚀环境为重点,构建贝叶斯神经网络(BNN)模型,利用实桥检测数据逆向推导不确定因素的概率分布,对计算模型及参数进行修正,以期更精准地预测桥梁可靠度指标和剩余使用寿命。

1 侵蚀环境下混凝土结构劣化模型

混凝土结构在服役过程中难免遭受各类侵蚀作用,其中以混凝土碳化和氯离子侵蚀最为常见。这些侵蚀会导致混凝土强度衰减、保护层出现剥落和开裂现象,进而加剧钢筋锈蚀进程。值得注意的是,实际工程中结构往往并非仅受单一侵蚀作用影响,多种侵蚀因素之间存在复杂的相互作用。

1.1 混凝土强度劣化模型

碳化和氯离子侵蚀作用会改变混凝土的孔隙分布,进而影响混凝土的强度。对建造时间比较久的建筑物混凝土强度进行相关分析和统计可以发现,混凝土的强度服从正态分布,随着时间的推移,其标准差和平均值会发生变化。牛获涛^[1-2]在总结分析国内外混凝土长期暴露试验和经年建筑物实测结果的基础上,揭示了不同侵蚀环境下混凝土强度的变化规律,提出了混凝土强度的时变数学模型,见式(1)。

$$\begin{cases} \sigma_f(t) = \sigma_0 \eta(t) \\ \mu_f(t) = \mu_0 \xi(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\sigma_f(t)$ 为混凝土经过 t 年之后抗压强度的标准差; $\mu_f(t)$ 为混凝土经过 t 年之后抗压强度的平均值; σ_0 为混凝土 28 d 抗压强度的标准差; μ_0 为混凝土 28 d 抗压强度的平均值; $\eta(t)$ 为混凝土抗压强度标准差随时间变化函数; $\xi(t)$ 为混凝土抗压强度平均值随时间变化函数。

海洋环境中:

$$\eta(t) = 0.0143t + 1.0624 \quad (2)$$

$$\xi(t) = 1.2448 \text{EXP}[-0.0347(\ln t - 0.3468)^2] \quad (3)$$

大气环境中:

$$\eta(t) = 0.0305t + 1.2368 \quad (4)$$

$$\xi(t) = 1.4529 \text{EXP}[-0.0346(\ln t - 1.7154)^2] \quad (5)$$

1.2 多因素耦合下氯离子侵蚀模型

扩散被认为是氯离子传输最主要的传输方式。Collepardi 等^[11]首先提出用 Fick 第二定律描述氯离子在混凝土中的扩散。假定混凝土是半无限等效均匀体,氯离子在混凝土中的扩散过程是一维扩散。当初始条件为 $t=0, x>0$ 时, $c=c_0$;边界条件为 $x=0, t>0$ 时, $c=c_s$,则扩散理论模型公式为:

$$c(x, t) = c_0 + (c_s - c_0) \left(1 - \text{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad (6)$$

式中: $c(x, t)$ 为扩散时间为 t 时距离混凝土表面 x 处的氯离子浓度; c_0 为混凝土内的初始自由氯离子浓度; c_s 为混凝土暴露表面的自由氯离子浓度; D 为氯离子扩散系数;erf 为误差函数。

由式(6)可知,影响氯离子浓度的主要因素包括:氯离子扩散系数、初始氯离子扩散系数、混凝土表面氯离子浓度、临界氯离子浓度。国内外对氯离子浓度模型的研究也主要集中在这几个因素上。

2 预应力钢筋锈蚀模型

预应力钢筋强度高、截面小,其锈蚀行为具有典型的坑蚀特征,即便腐蚀率处于较低水平,钢绞线的受拉力学性能仍可能发生显著衰减。

目前,学界普遍将预应力钢筋的锈蚀形态归结为电化学腐蚀、应力腐蚀和疲劳腐蚀这3类。其中,电化学腐蚀的本质是预应力钢绞线表面形成腐蚀微电池,阳极金属发生氧化溶解反应,最终引发锈蚀;应力腐蚀是指钢绞线在腐蚀介质与持续应力的耦合作用下,发生的低应力脆性断裂现象,不过李富民^[5]通过钢绞线微观结构观测与长期试验研究,提出了钢绞线对应力腐蚀不敏感的观点;疲劳腐蚀则是交变荷载与腐蚀环境协同作用的产物,钢绞线表面的蚀坑会形成应力集中源,加速疲劳裂纹的萌生与扩展,二者的耦合效应会大幅缩短钢绞线的服役寿命。

2.1 钢筋腐蚀开始时间

根据 1.2 节,假定初始时刻混凝土内不含有自由氯离子,即 $c_0=0$,根据临界氯离子浓度的定义,令式(6)中 x 等于保护层厚度,氯离子浓度为临界氯离子浓度 c_{cr} ,即可得到钢筋开始腐蚀的时间 t_i :

$$t_i = \frac{c^2}{4D \cdot \operatorname{erf} \operatorname{inv}^2 \left(1 - \frac{c_{cr}}{c_s} \right)} \quad (7)$$

式中: $\operatorname{erf} \operatorname{inv}$ 为 erf 的反函数; c_{cr} 为临界氯离子浓度; c 为钢筋保护层厚度。

2.1.1 氯离子扩散系数对锈蚀时间的影响

为了研究锈蚀开始时间对氯离子扩散系数的敏感度,采用 MATLAB 软件预测不同氯离子扩散系数下的钢筋锈蚀时间。以某一具体案例进行分析:某位于潮汐区的钢筋混凝土桥梁,采用 C50 混凝土建造,保护层厚度为 60 mm。为了使研究更具有普适性,氯离子扩散系数采用实测值。

罗大明等^[12]汇总了多位学者关于氯离子扩散系数的试验和实桥检测成果。考虑到预应力钢筋混凝土桥梁通常采用高强度混凝土,本文选取文献[12]中水灰比在 0.30~0.45 区间的氯离子扩散系数实测值 $1.00 \times 10^{-12} \sim 12.95 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

钢筋锈蚀时间与氯离子扩散系数关系图见图 1。

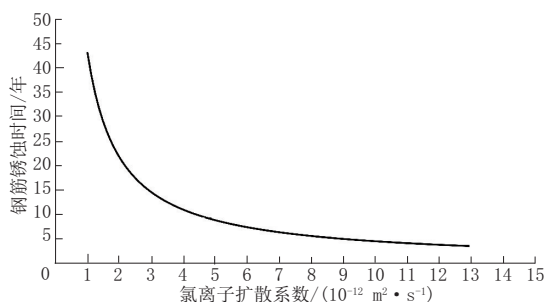


图1 钢筋锈蚀时间与氯离子扩散系数关系图

由图 1 可知,在上述氯离子扩散系数区间内,钢筋开始锈蚀的时间跨度极大,从不足 5 年到 40 余年不等。这一结果表明,锈蚀开始时间对氯离子扩散系数敏感度较高,取值误差会对后续结构可靠度的计算产生重要影响。

2.1.2 保护层厚度对锈蚀时间的影响

为了研究锈蚀开始时间对结构保护层厚度的敏感度,本文借助 MATLAB 软件,采用蒙特卡洛算法,针对不同混凝土保护层厚度条件下,潮汐浪溅区、海岸线附近和近海大气区的钢筋初始锈蚀时间展开预测。潮汐浪溅区、海岸线附近钢筋锈蚀时间与保护层厚度关系图见图 2;近海大气区钢筋锈蚀时间与保护层厚度关系图见图 3。

假定氯离子扩散系数满足正态分布,临界氯离子浓度、表面氯离子浓度取值参考《混凝土结构耐久性评定标准》(CECS 220:2007)。

由图 2、图 3 可知,在同一环境下,初始锈蚀时间

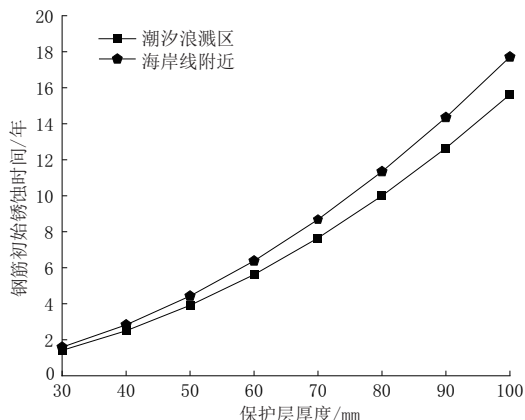


图2 潮汐浪溅区、海岸线附近钢筋锈蚀时间与保护层厚度关系图

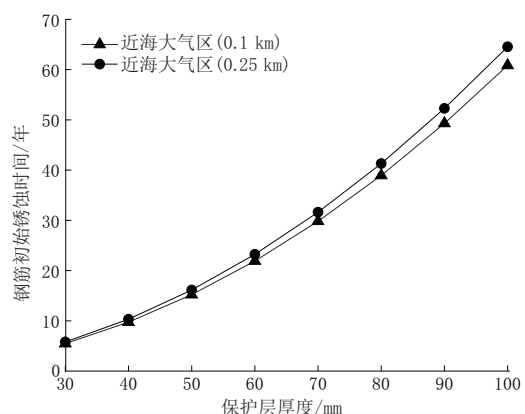


图3 近海大气区钢筋锈蚀时间与保护层厚度关系图

随着保护层厚度的增加而大幅增加,因此保护层厚度对钢筋开始锈蚀时间影响显著,增加保护层厚度是提高钢筋混凝土桥梁耐久性的较好方法。

值得注意的是,初始锈蚀时间对氯离子扩散系数和保护层厚度的敏感性较高,因此预测桥梁承载力和剩余使用寿命时,氯离子扩散系数和保护层厚度的计算取值应当尽可能精确,否则计算结果偏差较大。

2.2 预应力钢筋腐蚀量预测模型

彭建新^[7]提出了 1 根腐蚀的预应力钢绞线在均匀腐蚀状态下, t 时刻的半径减少量 $\Delta r(t)$ 计算式:

$$\Delta r(t) = 0.0116 i_{\text{corr}} (t - t_s) \quad (8)$$

式中: t_s 为腐蚀开始时间, a; i_{corr} 为腐蚀电流密度, $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。

根据现有文献调查,在湿度环境为 70% ~ 80% 下,腐蚀电流密度服从对数正态分布,均值为 $0.25 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。

1 根由 7 根钢丝组成的预应力钢筋,在服役 t 年后的剩余面积 A_{st} 为:

$$A_{\text{st}} = \begin{cases} 7\pi r^2 & 0 \leq t \leq t_s \\ 3\pi r^2 + 4\pi [r - \Delta r]^2 & t_s < t \leq 100 \end{cases} \quad (9)$$

2.3 锈蚀预应力钢筋屈服强度模型

李富民^[5]通过对锈蚀钢绞线的静力拉伸试验发现,受腐蚀的钢绞线在受拉过程中,各钢丝存在明显的不同步断裂现象;同时,蚀坑的存在会使钢绞线脆性增强,其最大承拉力与极限平均应变均有所降低。具体而言,当腐蚀率处于0%~0.85%区间时,钢绞线的最大承拉力下降幅度约为9%~23%,极限平均应变的降低幅度则达到50%~80%;而在此腐蚀率范围内,钢绞线的名义弹性模量未呈现出显著变化。

《混凝土结构耐久性评定标准》在梳理既有研究成果的基础上,提出了预应力钢筋屈服强度 f_y 的时变模型:

$$f_y(t) = f_{y0} \left(1 - a_y \frac{\Delta A'_{st}(t)}{A_{st}} \times 100 \right) \quad (10)$$

式中: f_{y0} 为未腐蚀钢筋的屈服强度,MPa; a_y 为实验系数; $\Delta A'_{st}(t)$ 为钢筋锈蚀引起的截面损失量, mm^2 ; A_{st} 为未锈蚀钢筋的截面积, mm^2 。

3 结构可靠度及剩余寿命预测

3.1 传统结构可靠度及剩余寿命预测

工程中常用的可靠性模型可以表示为:

$$Z(t) = R(t) - S(t) \quad (11)$$

式中: $Z(t)$ 为极限状态随机过程; $R(t)$ 为结构抗力随机过程; $S(t)$ 为作用效应随机过程。

可靠度计算方法有多种,常见的是一次二阶矩法和蒙特卡洛法。

一次二阶矩法也是规范中采用的方法,当随机变量服从正态分布或对数正态分布,功能函数接近线性或非线性程度较低时,可根据均值和方差快速求解可靠度指标。但一次二阶矩法对非线性功能函数误差较大,未考虑随机变量的高阶矩和分布类型影响。

蒙特卡洛法计算时变可靠度的核心思路是通过大量随机抽样来模拟结构参数的不确定性,可适用于功能函数复杂(如非线性、分段函数)的情况。将影响桥梁承载力的随机变量定义为 X_i ,并确定其概率分布模型(正态分布、对数正态分布等),通过大量随机抽样,代入功能函数计算 Z 值,并统计 $Z < 0$ 的样本数量比例,将其作为失效概率,精度则可通过增加样本量控制,理论上无偏差。但蒙特卡洛法计算效率低,尤其当失效概率极小(失效概率 $P_f < 10^{-6}$)时,需百万级以上样本。

依据《公路工程结构可靠性设计统一标准》

(JTG 2120—2020),桥梁结构安全等级为一级时,延性破坏的目标可靠度指标为4.7,脆性破坏目标可靠度指标为5.2。

3.2 基于贝叶斯动态更新的可靠度及剩余寿命预测

侵蚀环境下预应力钢筋混凝土桥梁承载力的不确定性可概括为模型不确定性和模型参数不确定性。

模型不确定性:氯离子侵蚀及预应力钢筋腐蚀的发生机制极为复杂,其影响因素涵盖环境、材料、结构等多个层面。当前所采用的氯离子侵蚀模型和预应力钢筋锈蚀模型,均是基于实验数据构建的预测性模型。这类模型在计算模式上本身存在固有不确定性,且受限于认知水平和实验条件,其计算参数无法全面涵盖并精准量化所有影响因素,导致模型输出结果与实际情况可能存在偏差。

模型参数不确定性:为便于工程实际应用,模型中往往引入常数参数,并根据水灰比、温度等影响因素将其拟合为固定值。然而,每座桥梁所处的具体环境存在显著差异,如有害离子浓度、温湿度等条件各不相同,同时桥梁自身的材料配合比也存在独特性。这种唯一性和特殊性使得固定化的参数取值难以完全贴合实际情况,从而引发参数取值与实际状态之间的偏差。

值得注意的是,即便在可靠度计算中,将各类影响因素视为随机变量,并基于其概率分布求解可靠度指标,最终结果仍不可避免地存在误差。在此背景下,利用桥梁检测数据,通过贝叶斯神经网络(BNN)实现动态更新的方法,为有效减少这类误差提供了极具潜力的解决思路。例如:罗大明等^[12]用贝叶斯原理拟合氯离子扩散系数;陈龙等^[13]用贝叶斯原理更新逆高斯过程抗力退化模型参数。

贝叶斯算法原理是用观测数据对先验概率分布进行修正,核心表达式为:

$$p(\theta | D) = \frac{p(D | \theta)p(\theta)}{p(D)} \quad (12)$$

式中: $p(\theta | D)$ 为后验分布,代表融合检测数据后,参数 θ 的更新概率分布; $p(D | \theta)$ 为似然函数,代表在参数 θ 下,观测数据 D 出现的概率; $p(\theta)$ 为参数 θ 的先验分布; $p(D)$ 为证据因子,数学上,其值为 $\int p(D | \theta)p(\theta)d\theta$,通常不影响分布形态,仅确保后验分布满足概率之和为1。

贝叶斯动态更新法计算流程如下:(1)参数识

别,确定先验分布,构建初始可靠度模型;(2)采集并处理检测数据,确定似然函数;(3)贝叶斯更新,计算后验分布;(4)用更新后的参数后验分布重新计算桥梁承载力可靠度;(5)根据桥梁不同生命周期的检测数据,重复上述步骤(2)~(4),进行动态更新。

具体计算流程图见图4。

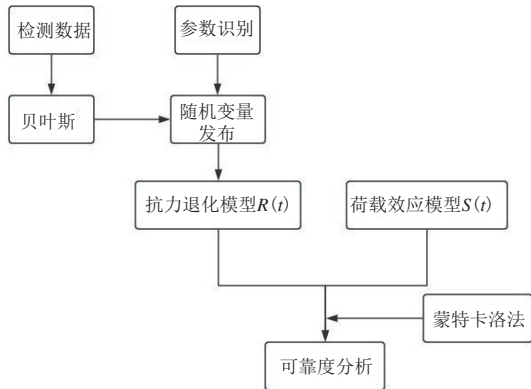


图4 贝叶斯动态更新法可靠度分析流程

4 工程实例

以1座1×30 m预应力钢筋混凝土箱梁桥为例,对基于贝叶斯更新的可靠度计算进行介绍。

以既有研究提出的材料劣化模型作为先验模型,将模型参数的先验概率分布视为正态分布。

桥梁主要计算参数见表1。

表1 桥梁主要计算参数表

变量	均值	变异系数
氯离子扩散系数 $D/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	4.3×10^{-12}	0.20
保护层厚度 c/mm	61.07	0.049 6
混凝土表面氯离子浓度 $c_s/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2.7	

针对该桥梁服役20年的关键时间节点,开展专项检测工作,获取与前述随机变量对应的实测数据,对获取的原始监测数据进行异常值剔除和数据平滑处理,确保实测数据的准确性和有效性,为后续贝叶斯更新提供可靠的数据支撑。桥梁检测主要数据表见表2。

表2 桥梁检测主要数据表

变量	均值	变异系数
氯离子扩散系数 $D/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	5.1×10^{-12}	0.18
保护层厚度 c/mm	57	0.13
混凝土抗压强度 f_c/MPa	28.32	0.12

借助MATLAB软件,基于监测数据建立似然函数,采用贝叶斯算法求解后验概率分布,实现对劣化模型参数的动态更新,完成劣化模型的修正,使修正后的模型更贴合该桥梁的实际服役状态。基于更新后的随机变量分布参数,采用蒙特卡洛法生成大量

随机样本,样本数量取 10^6 次,以保证计算精度;统计失效样本占比,基于可靠度指标与失效概率的映射关系,计算可靠度指标。

以10年为一个验算周期,对桥梁100年设计使用寿命期的可靠度指标进行预测,得到不同时间节点的可靠度演化规律。具体预测结果如图5所示,该结果可为桥梁的养护决策和寿命评估提供量化依据。

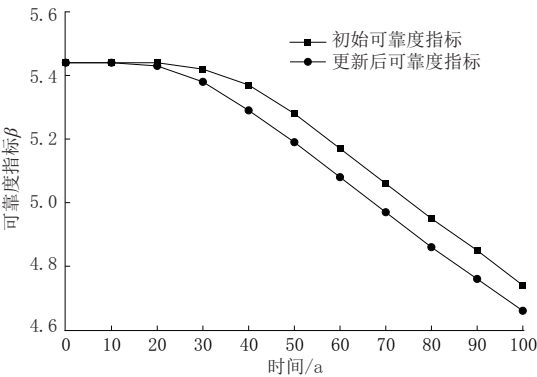


图5 桥梁使用寿命期内可靠度指标预测

由图5可知,可靠度指标在前30年几乎没有变化,42年后发生明显下降。这是由于预应力钢筋一旦开始锈蚀,此后的性能和面积就会快速降低导致。根据初始可靠度曲线,其100年理论计算的可靠度为4.74,尚可满足《公路工程结构可靠性设计统一标准》(JTG 2120—2020)要求,但用贝叶斯更新后,可靠度指标在93年时就已接近目标值,预期使用寿命减少了7年。后续可通过多次检测、更新,使预测结果更接近实际情况。

5 结 语

(1)在 $1 \times 10^{-10} \sim 12.95 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 氯离子扩散系数区间内,其他因素不变的情况下,钢筋开始锈蚀的时间跨度从不足5年到40余年不等。结果表明,氯离子扩散系数对锈蚀起始时间具有显著影响。

(2)在同一环境下,初始锈蚀时间随着保护层厚度的增加而大幅增加,保护层厚度对钢筋开始锈蚀时间影响显著。

(3)通过理论模型实现了对某预应力钢筋混凝土桥梁的可靠度预测,并将检测数据通过贝叶斯神经网络对计算结果进行更新。结果显示,可靠度指标在93年时就已接近目标值,预期使用寿命比更新前减少了7年。

(4)影响预应力钢筋混凝土桥梁承载力的因素有很多,本文仅考虑氯离子侵蚀环境下的桥梁抗力

(下转第51页)