

基于时变可靠度理论的桥梁状态评估

王 斌¹, 彭 石², 彭建新²

¹广东省高速公路发展股份有限公司佛开分公司, 广东 广州

²长沙理工大学土木工程学院, 湖南 长沙

收稿日期: 2024年12月21日; 录用日期: 2025年1月12日; 发布日期: 2025年1月23日

摘 要

为对某连续刚构桥进行状态评估, 结合时变可靠度研究方法, 考虑混凝土强度时变效应和预应力筋强度时变效应等因素, 建立其时变可靠度模型, 通过有限元软件进行模拟分析, 采用不确定分析手段, 对桥梁的相关统计参数进行抽样, 对其连续刚构段进行计算, 计算考虑时变因素下的桥梁失效概率并研究时变效应对评估桥梁失效概率的影响, 得到设计使用年限内服役时间与可靠度指标之间的关系, 对桥梁状态进行评估。研究表明, 基于可靠度方法对现役桥梁状态进行评估时, 考虑混凝土强度时变效应和预应力筋强度的时变效应计算得到的失效概率曲线斜率均大于不考虑时变效应时的曲线斜率, 对桥梁状态预测的结果更为安全。

关键词

桥梁状态评估, 有限元模拟, 时变模型, 可靠度

Condition Assessment of Bridge Based on Time-Varying Reliability Theory

Bin Wang¹, Shi Peng², Jianxin Peng²

¹Fokai Branch, Guangdong Expressway Development Co., Ltd., Guangzhou Guangdong

²School of Civil Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha Hunan

Received: Dec. 21st, 2024; accepted: Jan. 12th, 2025; published: Jan. 23rd, 2025

Abstract

For the state assessment of a certain continuous rigid-frame bridge, combined with the time-varying reliability research method, factors such as the time-varying effect of concrete strength and the time-varying effect of prestressed tendon strength are considered to establish its time-varying reliability model. Simulation analysis is conducted through finite-element software. Uncertainty analysis

文章引用: 王斌, 彭石, 彭建新. 基于时变可靠度理论的桥梁状态评估[J]. 土木工程, 2025, 14(1): 131-138.

DOI: 10.12677/hjce.2025.141017

methods are used to sample the relevant statistical parameters of the bridge, and calculations are made for its continuous rigid-frame section to calculate the bridge failure probability considering time-varying factors and to study the impact of time-varying effects on the bridge failure probability. The relationship between the service time within the design service life and the reliability index is obtained to evaluate the bridge state. Research shows that when evaluating the state of existing bridges based on the reliability method, the slopes of the failure probability curves calculated by considering the time-varying effects of concrete strength and prestressed tendon strength are both greater than those of the curves without considering the time-varying effects, and the results of bridge state prediction are more reliable.

Keywords

Bridge Condition Assessment, Finite Element Simulation, Time-Varying Model, Reliability

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

基于可靠度理论的桥梁状态评定在实际工程中广泛应用，国内外学者对此进行了许多研究。罗育明等人[1]结合钢筋混凝土 T 型梁桥增大截面加固的特点，建立 Monte-Carlo 法计算加固前后的可靠度指标。通过对比可靠度指标，评估加固效果，并进行敏感性分析，找出影响可靠度的环境因素，以采取相应的措施提高可靠度；刘健等人[2]基于响应面法与 JC 法，以深中通道伶仃洋大桥为背景，对其索缆体系在极值风荷载作用下的可靠度进行分析，并与类似的悬索桥缆索体系可靠度指标对比，验证了该方法的准确性；李文杰等人[3]通过分析我国公路桥梁设计规范，提出了汽车荷载效应和抗力调整系数的概念，确定了不同破坏形式下在役混凝土桥梁的安全性能评估表达式和目标可靠指标，建立了可靠度评估方法。基于工程应用需要，提出了“双控”思想的安全性实用评估方法，并通过工程实例验证了其可行性；Bian 等人[4]提出了一种改进的非概率全局最优求解方法，用于求解非概率可靠性指数。并且提出了既有桥梁的非概率可靠性评估过程，并成功应用于龙干湖桥的非概率可靠性评估和加固；Wang 等[5]研究并比较了既有桥梁斜拉索的可靠性评估，通过识别斜拉索的张力和监测桥梁荷载，提出了两种性能函数来计算索的可靠度指标：一种是直接利用监测到的索力；另一种是基于监测荷载与有限元法模拟的桥梁可靠度指标；程健等[6]采用可靠度指标对桥梁性能进行了评估，通过可靠度指标大小与桥梁容许可靠指标进行对比，来决定是否对桥梁进行维护。但是上述可靠度研究方法在对桥梁状态进行评估时，并未考虑时间因素对抗力退化的影响，而实际上抗力的退化是混凝土强度退化、预应力筋强度损失等不利因素的综合影响。

因此本文以某连续刚构桥为例，考虑混凝土强度的时变效应、预应力损失的时变效应等影响，建立时变抗力模型，研究时变效应的影响下，设计使用年限内桥梁服役时间与失效概率之间的关系，对其服役时间内的承载能力进行评估并且通过设计使用年限内服役时间与可靠度指标之间的关系预测该桥梁的使用寿命。

2. 模型建立

2.1. 传统可靠度评估方法

极限状态函数是可靠度分析方法的核心，对于一般桥梁，根据规范[7]可得极限状态方程为：

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

式中 R 是结构的抗力(如抗弯、抗剪能力等), S 是作用在结构上的荷载效应(包括恒载、活载、风载等产生的内力和应力)。当 $Z > 0$ 时, 结构处于安全状态; 当 $Z < 0$ 时, 结构可能发生破坏。

然后确定随机变量及其概率分布, 最后计算可靠度指标以此评估桥梁状态。传统可靠度方法对桥梁状态进行评定时, 存在一定的局限性, 对时变效应的影响考虑不足, 本文考虑混凝土强度、预应力损失、预应力筋面积等因素下随年限增长的时变信息, 以此建立时变概率衰减模型。

2.2. 混凝土强度的时变模型

根据文献[8]混凝土强度 $\mu_{f_{cu}}(t)$ 和标准差 $\sigma_{f_{cu}}(t)$ 的时变模型如下:

$$\begin{cases} \mu_{f_{cu}}(t) = \mu_{f_{cu,0}} \cdot 13781e^{-0.01875(\ln t - 1.7282)^2} \\ \sigma_{f_{cu}}(t) = \sigma_{f_{cu,0}} \cdot (0.0347t + 0.9772) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\mu_{f_{cu,0}}$ 为混凝土 28 d 抗压强度的平均值, $\sigma_{f_{cu,0}}$ 为混凝土 28 d 抗压强度的标准差。

2.3. 预应力损失的时变模型

预应力损失率的时变模型如下:

$$\delta_{\text{loss}} = \begin{cases} 0 & 0 \leq t \leq t_s \\ \frac{4}{7} - \frac{4}{7} \left(1 - \frac{\Delta r(t)}{r}\right)^2 & t_s \leq t \leq 100 \end{cases} \quad (3)$$

式中: t 为通车后持续时间, 按年(a)计; t_s 为预应力筋开始锈蚀时间; r 为一根钢丝的半径; $\Delta r(t)$ 为一根钢丝在 t 时刻的面积减少量。

2.4. 预应力筋截面面积退化时变模型

由式(3)可知, 要计算预应力钢筋随时间损失的大小, 首先需确定钢筋开始锈蚀时间 t_s , 钢筋开始锈蚀时间 t_s 与碳化残余量和碳化系数有关, 其表达式如下:

$$t_s = \left[\frac{c - x_0}{k} \right]^2 \quad (4)$$

式中: c 为混凝土保护层厚度(mm), 当 $c > 50$ 时, 取 $c = 50$ mm; x_0 为碳化残量; k 为碳化系数。

根据文献[9]可知碳化残量 x_0 表达式如下:

$$x_0 = 4.86 \left(-RH^2 + 1.5RH - 0.45 \right) (c - 5) (\ln f_{cu,k} - 2.30) \quad (5)$$

式中: RH 为年平均环境湿度(%)。

式(4)中碳化系数 k 表达式如下:

$$\begin{cases} k = 2.56 k_{mc} k_j k_{CO_2} k_p k_s k_e \left(\frac{57.94}{f_{cu}} m_c - 0.76 \right) \\ k_e = \sqrt[4]{T RH (1 - RH)} \\ k_{CO_2} = \sqrt{\frac{V}{0.03}} \end{cases} \quad (6)$$

式中: k_{mc} 为计算模式不定性随机变量, 均值为 0.996, 标准差为 0.355; k_j 为钢筋位置修正系数, 角部 $k_j = 1.4$,

非角部 k_j 1.0; k_{CO_2} 为 CO_2 浓度影响系数, $k_{CO_2} = 1.2-1.4$; k_p 为浇注面修正系数, $k_p = 1.2$; k_s 为工作应力影响系数, 取 1.1; m_c 为混凝土立方体抗压强度平均值与标准值之比; T 为年环境平均温度($^{\circ}C$)。

根据文献[10]预应力筋钢绞丝在 t 时刻的半径减少量:

$$\Delta r(t) = 0.0116i_{corr}(t-t_s) \quad (7)$$

式中: t_s 为碳化开始时间, i_{corr} 为碳化腐蚀电流密度($\mu A/cm^2$)。

一根预应力筋由 7 根预应力丝(直径为 4.3 mm)组成。一根预应力筋在腐蚀 t 年后的剩余面积:

$$A_{st}(t) = \begin{cases} 7\pi_r^2, & 0 \leq t < T_i \\ 3\pi_r^2 + 4\pi[r - \Delta_r(t)]^2, & T_i \leq t < r/0.0116i_{corr} \end{cases} \quad (8)$$

2.5. 结构时变抗力模型

2.5.1. 结构几何参数不确定

结构的几何参数值 a 是极限状态方程中的一个基本变量, 是影响结构抗力的主要因素之一。为此可通过大量的桥梁结构几何检测数据, 应用统计学得到其几何参数的概率分布模型和统计参数。根据规范中给出的几何参数不定性计算式可表达为:

$$\Omega_a = \frac{a}{a_k} \quad (9)$$

平均值:

$$\mu_{\Omega a} = \mu_a / a_k$$

变异系数:

$$\delta_{\Omega a} = \delta_a$$

式中: a 为结构构件的实际几何参数值; a_k 为结构构件几何参数标准值, 即设计几何参数值; μ_a 、 δ_a 分别为结构构件几何参数的平均值和变异系数。该桥实际几何参数值与结构构件设计几何参数值相差不大, 因此该参数可在后续计算中可取 1。

2.5.2. 计算模式不确定性

抗力计算中采取某些基本假定的近似性和计算公式的不精确性会引起抗力值的不定性, 或称为“计算模型误差”。根据规范中给出的几何参数不定性计算式可表达为:

$$ME_N = R^0 / R^C \quad (10)$$

式中: R^0 为结构构件的实际抗力值, 取试验值; R^C 为按规范公式计算的抗力值, 计算时采用材料性能和几何尺寸的实测值, 以排除它们的变异性对分析 ME_N 的影响。

2.5.3. 抗力时变模型

结合上文中结构时变因素的抗力时变模型的研究成果, 可得到连续刚构段承载能力极限状态下预应力混凝土桥梁的抗力时变概率模型, 表达式如下:

$$R(t) = \Omega_f \cdot ME_N \cdot [f_{pd}(t)A_p(t) + f_{sd}A_s] \cdot \left[h_0 - \frac{f_{pd}(t)A_p(t) + f_{sd}A_s - f'_{pd}(t)A'_p(t)}{2f_{cd}(t)b_f} \right] \quad (11)$$

式中: Ω_f ——结构几何参数不确定性系数; ME_N ——抗力计算模型不确定系数; f_{st} ——受拉区普通钢筋的抗拉强度; $f_{pd}(t)$ —— t 时刻受拉区预应力筋的实际抗拉强度; $f'_{pd}(t)$ —— t 时刻受压区预应力筋的实际抗拉强度; A_s ——受拉区普通钢筋剩余面积; $A_p(t)$ —— t 时刻受拉区预应力筋剩余面积; $A'_p(t)$ —— t 时刻受压区预应力筋剩余面积; b_f ——截面有效宽度; h_0 ——截面有效高度; $f_{cd}(t)$ ——混凝土抗压强度时变值。

2.6. 结构可靠度

由可靠度定义及规范[7]可知, 随时间变化的可靠度评估极限状态方程[11]为:

$$Z(t) = R(t) - S_G - S_Q(t) \quad (12)$$

式中: $R(t)$ ——结构抗力随机变量时变值; $S(t)$ ——荷载效应随机时变值, 包括恒载和活载效应。

3. 工程算例

某连续刚构桥全长 320 m, 桥宽为 22.75 m。其设计荷载为: 公路-I 级, 人群 3.5 kN/m²。根据资料显示, 该地年环境平均湿度为 78% 左右, 年平均温度为 22.5℃, 平均碳化腐蚀电流密度为 0.17 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。

3.1. 算例参数

该桥采用 C60 混凝土, 跨径组合为 60 + 2 × 100 + 60 m, 截面形式为单箱单室箱型变截面, 梁高 2.5 m, 梁顶板横向宽 10.7 m, 底板宽 5.7 m, 截面预应力钢绞线根数 $n = 450$, 其中普通钢筋采用 HRB335 钢筋, 受拉区普通钢筋 100 根, 受拉区钢筋由 40 根直径 18 mm HRB335 钢筋以及 60 根直径 16 mm HRB335 钢筋组成, 受拉区钢筋总截面积为 $40 \times 254.5 + 60 \times 201.1 = 22246 \text{ mm}^2$, 受压区普通钢筋 156 根, 受压区钢筋均为直径 16 mm HRB335 钢筋, 受压区钢筋总截面积为 $156 \times 201.1 = 31371.6 \text{ mm}^2$ 。受压区预应力钢绞线根数为 154 根, 受拉区预应力钢绞线根数为 296 根, 预应力钢筋均为 7 丝钢绞线, 受压区预应力钢筋总截面积为 $154 \times 140 = 21560 \text{ mm}^2$, 受拉区预应力钢筋总截面积为 $296 \times 140 = 41440 \text{ mm}^2$ 。截面参数及跨中截面预应力筋布置如图 1 和图 2 所示。

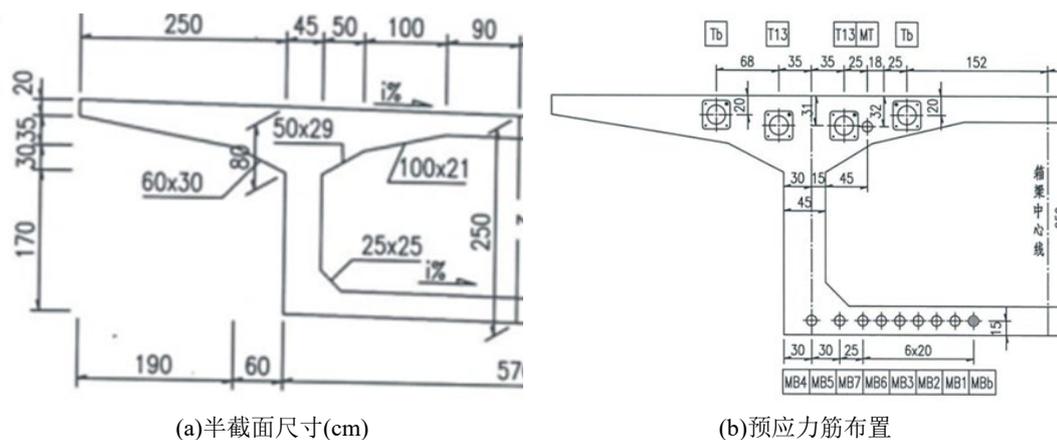


Figure 1. Cross section of midspan for main bridge
图 1. 主桥跨中梁截面图(cm)

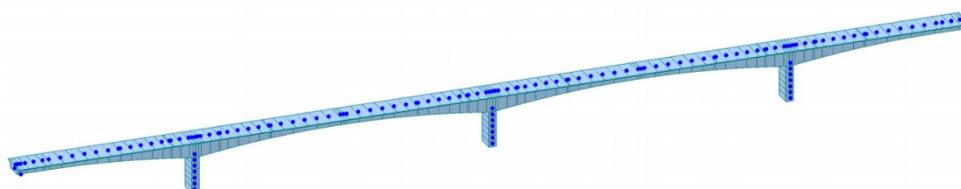


Figure 2. Midas model
图 2. Midas 模型截面图

该段主梁为箱型截面, 根据面积和惯性矩不变原则, 将其等效换算为工字形梁截面, 换算后梁截面

有效高 $h_0 = 2.35$ m, 有效宽度 $b_f = 9.487$ m, 并用 Midas 建立其有限元模型, 得出恒载效应为 4.905×10^4 kN·m, 车辆荷载效应为 1.073×10^4 kN·m。各初始统计参数如下表 1 所示。

Table 1. Statistical calculation parameters

表 1. 初始计算参数统计表

参数名称	符号	均值	变异系数	分布类型	数据来源
受拉区预应力筋抗拉强度	f_{pd}	$0.68f_{pk}$	0.025	正态	[10]
受压区预应力筋抗拉强度	f'_{pd}	$0.68f'_{pk}$	0.025	正态	[10]
抗力模型不确定性系数	ME_N	1.01	0.046	正态	[10]
恒载效应	S_G	$1.021 S_D$	0.0462	正态	[11]
汽车荷载效应(一般运行)	S_{Q1}	$0.6861 S_K$	0.16	极限I型	[12]
汽车荷载效应(密集运行)	S_{Q2}	$0.7995 S_K$	0.1082	极限I型	[12]
保护层厚度	C	50 mm	0.15	正态	[13]
混凝土抗压强度	f'_c	50.1 MPa	0.1411	正态	实测值

注: f_{pk} ——预应力筋的抗拉强度; S_D ——恒载标准值; S_K ——车辆荷载值。

3.2. 可靠度时变模型

结合实桥参数和可靠度计算理论, 得到时变可靠度评估的极限状态方程为:

$$Z(t) = R(t) - S_G - S_Q(t) \tag{13}$$

$$= ME_N \cdot [f_{pd}(t)A_p(t) + f_{sd}A_s] \cdot \left[h_0 - \frac{f_{pd}(t)A_p(t) + f_{sd}A_s - f'_{pd}(t)A'_p(t)}{2f_{cd}(t)b_f} \right] - S_G - S_Q(t)$$

式中: $R(t)$ ——结构抗力随机变量时变值; $S(t)$ ——荷载效应随机时变值, 包括恒载和活载效应, 其余参数含义可参考式(11)

3.3. 结果分析

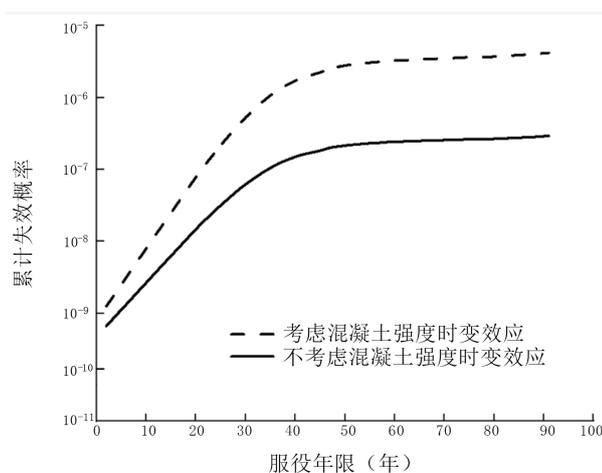


Figure 3. Cumulative failure probability considering the time-varying effect of concrete strength

图 3. 考虑混凝土强度时变效应下的累积失效概率

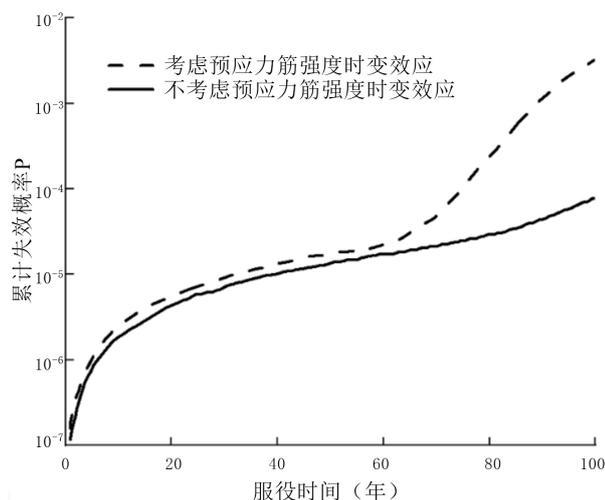


Figure 4. Cumulative failure probability considering the time-varying effect of prestressed reinforcement strength
图 4. 考虑预应力筋强度时变效应下的累积失效概率

结合表 1 随机参数及上文几何尺寸及材料参数, 采用 Monte-Carlo 模拟方法(抽样次数为 10^7), 对随机变量参数进行抽样。并使用本文建立的抗力时变退化模型, 分别考虑混凝土强度时变效应和考虑预应力筋强度的时变效应, 计算连续刚构梁跨中截面的累积失效概率。根据结果可知, 考虑混凝土强度的时变效应和考虑预应力筋强度的时变效应时, 累积失效概率的增长斜率大于不考虑混凝土强度时变效应以及不考虑预应力筋强度时变段, 对数据进行线性回归分析可知, 考虑混凝土强度时变效应的累积失效概率约为不考虑混凝土强度时变效应的 1.36 倍, 考虑预应力筋强度的累积失效概率约为不考虑预应力筋强度时变效应的 2.45 倍。因此在进行桥梁状态评估时, 为了更准确、更保守的评定桥梁状态, 有必要考虑时间因素的影响。如图 3, 图 4 所示。

最后根据失效概率与可靠度指标关系计算出设计寿命 100 年内的可靠度指标值。将上述主梁参数及建立的抗力模型计入可靠度分析模型中, 得到服役时间与可靠度理论指标值的关系, 结合《公路工程结构可靠度设计统一标准》可知, 服役第 77 年低于三级最低安全指标 3.7, 结构处于危险状态。如下图 5 所示。

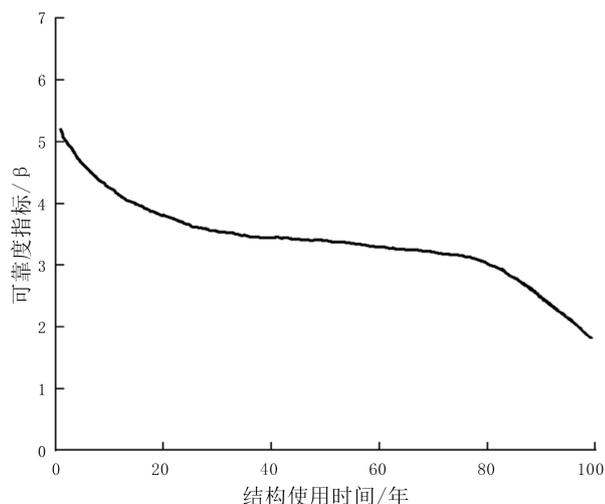


Figure 5. Reliability index of main beam
图 5. 主梁可靠度指标

4. 结论

本文建立了 Midas 模型, 可靠度分析与数值模拟相结合, 对实桥进行桥梁状态评估, 得出以下结论。

1) 基于时变可靠度理论, 考虑混凝土强度时变效应和预应力筋强度时变效应, 计算了连续刚构桥可靠度指标, 分析了其变化规律。

2) 考虑混凝土的强度时变效应和预应力筋强度时变效应时的概率曲线斜率均大于不考虑时变效应时的概率曲线, 基于时变可靠度的桥梁状态评定法, 更准确地反映桥梁在不同服役阶段的可靠度水平。

参考文献

- [1] 罗育明, 彭建新, 张建仁. 在役钢筋混凝土 T 型梁桥增大截面加固后可靠度研究[J]. 建筑结构, 2018, 48(S1): 611-616.
- [2] 刘健, 晏铖, 方其祥, 等. 基于响应面法与 JC 法结合的大跨度桥梁可靠度分析[J]. 桥梁建设, 2022, 52(4): 32-38.
- [3] 李文杰, 侯天宇, 赵君黎, 等. 基于可靠度理论的混凝土桥梁安全性评估方法研究[J]. 公路交通科技, 2017, 34(4): 87-92.
- [4] Bian, X., Chen, X., Yang, H. and You, C. (2019) Improved Nonprobabilistic Global Optimal Solution Method and Its Application in Bridge Reliability Assessment. *Advances in Civil Engineering*, **8**, Article ID: 8290317. <https://doi.org/10.1155/2019/8290317>
- [5] Lu, N., Liu, Y., Noori, M. and Xiao, X. (2020) System Reliability Assessment of Cable-Supported Bridges under Stochastic Traffic Loads Based on Deep Belief Networks. *Applied Sciences*, **10**, Article 8049. <https://doi.org/10.3390/app10228049>
- [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] 中华人民共和国建设部. GB/T 50283-1999 公路工程结构可靠度设计统一标准[S]. 北京: 中华人民共和国建设部, 1999.
- [8] 张建仁, 刘扬. 混凝土桥梁构件服役期的抗力概率模型[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2004, 1(1): 27-33.
- [9] 徐善华, 牛获涛, 王庆霖. 钢筋混凝土结构碳化耐久性分析[J]. 建筑技术开发, 2002, 29(8): 8-10.
- [10] 彭建新, 邵旭东, 张建仁. 考虑气候变化的受碳化腐蚀先张预应力混凝土梁时变可靠性评估[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2010, 7(2): 33-42.
- [11] 张建仁, 马亚飞, 王磊. 模型及参数不确定下钢筋锈蚀率动态演进分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(2): 542-549.
- [12] 张建仁, 龚文俊, 刘扬. 混凝土连续梁桥使用期的时变体系可靠度计算[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2006, 3(3): 54-60.
- [13] 张运涛, 孟少平. 基于响应面法的大跨连续刚构桥长期变形预测[J]. 土木工程学报, 2011, 44(8): 102-106.