

文章编号: 1005-0523(2022)04-0016-08



既有结构时变可靠度预测模型及计算方法研究

陈梦成^{1,2}, 张明阳^{2,3}, 方苇^{1,2}, 杨超^{1,2}, 李骐^{2,7}, 温清清^{1,2}, 谈勇⁴, 彭爱红⁵, 游勇利⁶

(1. 华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013; 2. 华东交通大学省部共建轨道基础设施性能监测和保障国家重点实验室, 江西 南昌 330013; 3. 江西交通职业技术学院建筑工程学院, 江西 南昌 330013; 4. 江西省交通运输厅高速公路管理处, 江西 南昌 330036; 5. 江西省交通工程集团建设有限公司, 江西 南昌 330006; 6. 江西省公路科研设计院, 江西 南昌 330002; 7. 江西省嘉和工程咨询监理有限公司, 江西 南昌 330009)

摘要:在复杂环境与荷载作用下, 桥梁的抗力会随着时间的推移而退化, 可靠性降低, 导致桥梁提前破坏, 这关系到桥梁耐久性、适用性和安全性问题。准确评估桥梁的安全状况, 为桥梁管养部门在维护、维修和修复等方面及时提出合理建议措施, 意义重大。文章首先建立了 Gamma 随机过程抗力退化模型与泊松 (Poisson) 随机过程荷载模型。在此基础上, 基于抗力和荷载效应相互独立的基本假定, 使用条件概率公式, 严格得到了结构失效概率计算表达式, 并提出了一种改进的时变可靠度 Monte Carlo 计算方法, 最后用 Matlab 语言编制了相应计算程序。作为一个应用算例, 利用文章所建立的双随机过程模型和可靠度计算方法, 分析了某现钢筋混凝土 T 型梁桥服役 20 a 的抗力可靠度衰减规律。与传统的时变可靠度计算方法相比, 本文方法不但可行、有效, 而且效率高。另外, 以腐蚀机制下的桥梁抗力退化模型为例, 预测得到桥梁在后 30 a 时的失效概率以及可靠指标。

关键词:桥梁工程; 退化模型; 荷载模型; 随机过程; 时变可靠度

中图分类号: U446.3

文献标志码: A

本文引用格式: 陈梦成, 张明阳, 方苇, 等. 既有结构时变可靠度预测模型及计算方法研究[J]. 华东交通大学学报, 2022, 39(4): 16-23.

DOI: 10.16749/j.cnki.jecjtu.20220727.014

Study on Time-Varying Reliability Prediction Model and Calculation Method of Existing Structures

Chen Mengcheng^{1,2}, Zhang Mingyang^{2,3}, Fang Wei^{1,2}, Yang Chao^{1,2}, Li Qi^{2,7}, Wen Qingqing^{1,2},
Tan Yong⁴, Peng Aihong⁵, You Yongli⁶

(1. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. State Key Laboratory of Performance Monitoring and Guarantee of Rail Transportation Infrastructure, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 3. School of Architectural Engineering, Jiangxi Communications Vocational and Technical College, Nanchang 330013, China; 4. Expressway Management Office of Jiangxi Provincial Department of Transportation, Nanchang 330036, China; 5. Jiangxi Communications Engineering Group Construction Co., Ltd, Nanchang 330006, China; 6. Jiangxi Highway Research and Design Institute, Nanchang 330002, China; 7. Jiangxi Jiahe Engineering Consulting and Supervision Co., Ltd, Nanchang 330009, China)

Abstract: Under complex environment and load, the deterioration of bridges resistance overtime will reduce the reliability and finally an unexpected failure occur suddenly impacting the durability, adaptability and safety of bridges. Therefore, it is of great significance to evaluate accurately the safety state of bridge and put forward

收稿日期: 2021-11-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878275); 江西省交通运输厅科技项目(2019Q0024); 江西省交通运输厅科技项目(2021H0009); 江西省教育厅科技项目(GJJ90299)

timely reasonable suggestions and measures in maintenance, repair and resilience for bridge management and maintenance department. A Gamma stochastic process model for resistance degradation and a Poisson stochastic process model for live load were firstly established. Based on the two models and basic assumption that resistance and load effect are independent of each other, an expression for calculating structural failure probability was thus derived by using conditional probability formula, and an improved method to compute time-dependent probability calculation with Monte Carlo sampling was proposed. Finally, the Matlab language was used to compile the corresponding numerical program. As a benchmark example, the proposed method was used to investigate the attenuation law of reliability in resistance of a 20 years reinforced concrete T-beam bridge. Compared to the conventional method for calculating time-dependent probability, the present method not only is feasible and effective, but also has higher efficiency. In addition, taking the bridge resistance degradation model under corrosion mechanism as an example, The failure probability and reliability index of the bridge in the next 30 years are predicted.

Key words: bridge engineering; degradation model; load model; random process; time varying reliability

Citation format: CHEN M C, ZHANG M Y, FANG W, et al. Study on time-varying reliability prediction model and calculation method of existing structures[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2022, 39(4): 16-23.

既有钢筋混凝土桥梁的时变可靠度评估主要可归结为三个方面:抗力退化时变模型建立、荷载时变模型建立以及时变可靠度计算方法。本文首先阐述既有钢筋混凝土桥梁结构抗力退化随机过程 Gamma 模型、荷载随机过程 Poisson 模型,然后构建基于双随机过程的极限状态函数,并建立蒙特卡洛抽样时变可靠度计算方法,最后,以某现役钢筋混凝土梁式桥为例,对梁式桥服役期为 20 a 与服役期为 50 a 时的时变可靠性进行了分析。

1 抗力退化随机模型

桥梁结构在服役期间,因受到可变荷载和振动、极端天气条件、除冰盐和冻融循环以及海洋环境中空气中氯化物等因素影响,将会导致其结构性能退化。近些年来,国内外对这方面进行了很多的相关研究^[1-12],提出了众多的桥梁结构抗力退化模型。

本文采用基于 Gamma 过程的抗力随机退化模型描述桥梁结构的抗力退化

$$R(t_n) = R_0 G \alpha(t_n) \quad (1)$$

$$G(t_n) = 1 - \sum_{i=1}^n G_i \quad (2)$$

$$G_i \sim G(\Delta x_i | \Delta a_i, b) \quad (3)$$

$$G(\Delta x_i | \Delta a_i, b) = b^{\Delta a_i} \frac{\Delta x_i^{\Delta a_i - 1} \exp(-\Delta x_i b)}{\Gamma(\Delta a_i)} \quad (4)$$

$$\Delta a_i = k(t_i^\alpha - t_{i-1}^\alpha) \quad (5)$$

式中: R_0 为初始时刻抗力; $R(t_n)$ 为 t_n 时刻抗力; $G(t_n)$ 为抗力退化系数; G_i 为服从 Gamma 分布的概率密度函数,随机变量是 $\Delta X(t)$,它描述的是:抗力退化为独立增量随机过程; Δa_i 为形状参数, b 为尺度参数; $\Gamma(\cdot)$ 表示 Gamma 函数; k 是退化参数, α 值根据主要的退化机制确定,如腐蚀($\alpha=1$)、硫酸盐侵蚀($\alpha=2$)和扩散控制时效($\alpha=0.5$)。

根据式(1)~式(5)可以估算桥梁结构任一时刻的抗力值。

2 荷载随机模型

荷载是影响桥梁结构可靠性以及寿命的另一个重要因素。在桥梁荷载中,有一类荷载,大小随时间变化很小,或者不变化,这就是恒载,譬如说桥梁自重,其大小是随机的,通常考虑为一个服从正态状态分布的随机变量。另外,还有一类荷载是随机发生的,其大小也是随机的,作用在桥梁上的时间非常短,这就是活载,容易引起桥梁结构发生损伤。如果荷载效应在其发生的间隔期间变化很小或很慢,为便于进行可靠性分析,可以认为它的大小是一个不变的量,即认为其对结

构的影响基本上是静态的。与桥梁服役寿命时间相比,重要荷载在桥梁上出现的持续时间非常短,而且出现的时间间隔可以认为服从指数分布。如图1所示,结构荷载效应随机过程模拟为一系列随机出现的脉冲,脉冲的大小为 S_j ,可以用滤过Poisson过程来描述^[13]。 $f_R(r)$ 为抗力的概率密度函数, $f_S(s)$ 为荷载的概率密度函数; $\mu_R(t)$ 为抗力的均值变化曲线, $\mu_S(t)$ 为荷载的均值变化曲线; T_1 为生命周期。

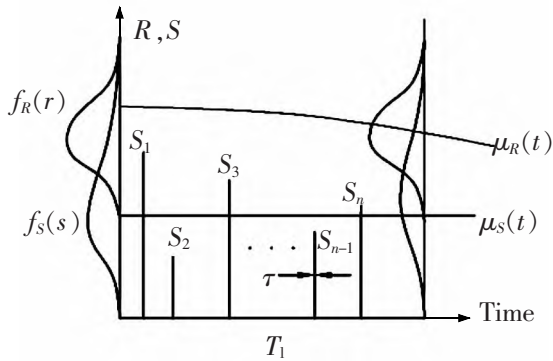


图1 荷载随机过程模型^[17]
Fig.1 Load stochastic process model^[17]

根据滤过泊松过程模型,在任一时长 τ 的区间 $(0, \tau)$ 内,发生车辆荷载次数 $N(\tau)$ 的概率为

$$P[N(\tau)=n]=\frac{(\lambda\tau)\exp(-\lambda\tau)}{n!} \quad (6)$$

式中: λ 为单位时间内荷载的平均发生次数。假设在时长 τ 内发生 n 次最不利荷载效应序列 $S_i, i=1, \dots, n$,它们相互独立且服从同一分布。根据相关研究^[7-9],我们假定 S_j 服从极值I型分布,则其概率分布函数为

$$F_S(S_i)=\exp\left[-\exp\left(-\frac{x-\mu_j}{\alpha_j}\right)\right] \quad (7)$$

式中: μ_j 为位置参数; α_j 为形状参数,且其与均值 m_j 和方差 σ_j 的关系为

$$\alpha_j=\frac{\sqrt{6}\sigma_j}{\pi}, \mu_j=m_j-\gamma\frac{\sqrt{6}\sigma_j}{\pi} \quad (8)$$

式中: γ 为欧拉常数,其值为0.577 215。

3 基于双随机过程的时变可靠度计算方法

桥梁结构的安全性可以用其可靠概率来衡量

$$L(T)=P(Z=R-S>0)=P(R>S)=\int_0^{\infty} F_S(r)f_R(r)dr \quad (9)$$

式中: $F_S(r)$ 是荷载效应的概率分布函数; $L(T)$ 为寿命 T 内的可靠概率; $P(\cdot)$ 为概率。

如前文所述,结构荷载效应和抗力均随时间

发生变化,这使得结构的可靠度随时间也发生变化。为了研究结构的时变可靠度,我们可假设寿命基准期 T_L 内可以分为 L 个时间长度为 τ 的相等的时间段,时间段序列为 $(0, t_1), (t_1, t_2), \dots, (t_{L-1}, t_L)$ 。假定结构失效模式为串联模式,则其可靠概率可以表示为

$$\begin{aligned} P_S(T_L) &= P[Z(t_1)>0]+ \\ & P[Z(t_2)>0|Z(t_1)>0]P[Z(t_1)>0]+\dots+ \\ & P[Z(t_L)>0|Z(t_{L-1})>0, \dots, Z(t_1)>0] \prod_{i=1}^{L-1} P[Z(t_i)>0] \\ & = P[R_0G(t_1)>S]+P[R_0G(t_1)>S \cap R_0G(t_2)>S]+\dots+ \\ & P[R_0G(t_1)>S \cap R_0G(t_2)>S \cap \dots \cap R_0G(t_L)>S] \\ & = F_S[R_0G(t_1)] + \prod_{i=1}^2 F_S[R_0G(t_i)] + \dots + \prod_{i=1}^L F_S[R_0G(t_i)] \end{aligned} \quad (10)$$

3.1 结构时段有效概率

根据Poisson过程模型,确定在任一时段 i 区间 (t_{i-1}, t_i) 内发生 n 次最不利荷载效应 $S_{ij}(j=1, \dots, n)$,并记下相应的发生时刻为 t_{ij} ,则该时段内结构可靠概率 P_{Si} 为

$$\begin{aligned} P_{Si} &= P(T_i|N(\tau)=n) \\ & = P[R_0G(t_{i1})>S_{i1} \cap \dots \cap R_0G(t_{in})>S_{in}] \\ & = \prod_{j=1}^n F_S(R_0G(t_{ij})) \end{aligned} \quad (11)$$

若考虑最 n 个不利荷载效应 S_{ij} 在时段长度 $\tau(t_{i-1}, t_i)$ 内发生的时刻 t_{ij} 是一个随机变量,而且服从同一分布和相互独立,概率密度函数记为 $f_T(t)$ 。一般假定 S_{ij} 在时段长 $\tau(t_{i-1}, t_i)$ 内发生的时刻 t_{ij} 服从均匀分布,则式(11)改写为

$$\begin{aligned} P_{Si} &= \int_{t_{i-1}}^{t_i} F_S[R_0G(t)]f_T(t)dt \\ & = \int_{t_{i-1}}^{t_i} F_S[R_0G(t)]\frac{1}{\tau}dt \end{aligned} \quad (12)$$

假定进一步考虑不利荷载效应 S_{ij} 发生次数 $N(\tau)=n$ 是一个随机变量,且服从泊松分布。若考虑 n 的全部可能性,则由全概率式(12)变为

$$\begin{aligned} P_{Si} &= \sum_{n=0}^{\infty} P_S(T_i|N(\tau)=n)P(N(\tau)=n) \\ & = \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \int_{t_{i-1}}^{t_i} F_S[R_0G(t)]\frac{1}{\tau}dt \right\}^n \frac{(\lambda\tau)^n \exp(-\lambda\tau)}{n!} \\ & = \exp\left[-\lambda\tau\left[1-\frac{1}{\tau}\int_{t_{i-1}}^{t_i} F_S[R_0G(t)]dt\right]\right] \end{aligned} \quad (13)$$

若再进一步考虑初始时刻抗力 R_0 是一个随机变量,其概率密度函数为 $f_{R_0}(r)$,则式(13)变为

$$P_{Si} = \int_0^{\infty} \exp \left[-\lambda \tau \left[1 - \frac{1}{\tau} \int_{t_{i-1}}^{t_i} F_S[R_0 G(t)] dt \right] \right] f_{R_0}(r) dr \quad (14)$$

若荷载包含活载 S_1 和恒载 S_2 , S_1 是随机过程, S_2 是随机变量,则根据全概率原理,式(14)变为

$$P_{Si} = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \exp \left[-\lambda \tau \left[1 - \frac{1}{\tau} \int_{t_{i-1}}^{t_i} F_S[R_0 G(t) - S_2] dt \right] \right] f_{S_2}(S_2) f_{R_0}(r) dS_2 dr \quad (15)$$

3.2 时段内结构失效概率

根据概率的性质,我们可以得到结构在时段 (t_{L-1}, t_L) 内的失效概率 P_{β_i} 为

$$P_{\beta_i} = 1 - P_{Si} \quad (16)$$

3.3 寿命基准期内总失效概率

根据各时段失效概率 P_{β_i} , ($i=1, \dots, L$) 和式(10), 我们即可得到寿命基准期 T_L 内桥梁结构的总失效概率 $P_f(T_L)$ 为

$$P_f(T_L) = P[Z(t_1) < 0] + P[Z(t_2) < 0 | Z(t_1) > 0] + \dots + P[Z(t_L) < 0 | Z(t_{L-1}) > 0, \dots, Z(t_1) > 0] \prod_{i=1}^{L-1} P[Z(t_i) > 0] \quad (17)$$

根据条件概率公式

$$P(A|B) = \frac{P(AB)}{P(B)} \quad (18)$$

则

$$P[Z(t_L) < 0 | Z(t_{L-1}) > 0, \dots, Z(t_1) > 0] \prod_{i=1}^{L-1} P[Z(t_i) > 0] = \frac{P[Z(t_L) < 0, Z(t_{L-1}) > 0, \dots, Z(t_1) > 0]}{P[Z(t_{L-1}) > 0, \dots, Z(t_1) > 0]} \prod_{i=1}^{L-1} P[Z(t_i) > 0] \quad (19)$$

若假定每个时段 $\tau(t_{i-1}, t_i)$ 内结构荷载效应和抗力均相互独立,这里笔者作出独立性假设的依据是:一方面,结构在各时点的抗力之间是相关的,但其相关性很难分析,将在另文阐述这方面的研究;另一方面,采用独立的抗力与荷载模型,可得到更加偏于保守,安全的结果^[14]。根据独立性假设,则式(19)可变形为

$$P[Z(t_L) < 0 | Z(t_{L-1}) > 0, \dots, Z(t_1) > 0] \prod_{i=1}^{L-1} P[Z(t_i) > 0] = P[Z(t_L) < 0, Z(t_{L-1}) > 0, \dots, Z(t_1) > 0] \quad (20)$$

将式(20)代入式(17)

$$\begin{aligned} P_f(T_L) &= P[Z(t_1) < 0] + P[Z(t_2) < 0, Z(t_1) > 0] + \dots + \\ &P[Z(t_L) < 0, Z(t_{L-1}) > 0, \dots, Z(t_1) > 0] = 1 - P[Z(t_1) > 0 + \\ &[1 - P[Z(t_2) > 0]] P[Z(t_1) > 0] + \dots + \\ &[1 - P[Z(t_L) > 0]] P[Z(t_1) > 0] + \dots + P[Z(t_{L-1}) > 0] \\ &= 1 - P[Z(t_L) > 0] \dots P[Z(t_{L-1}) > 0] P[Z(t_L) > 0] \\ &= 1 - \prod_{i=1}^L P_{Si} \end{aligned} \quad (21)$$

3.4 计算周期内可靠指标

假定在时段 $\tau(t_{i-1}, t_i)$ 内,时变可靠度指标用 $\beta(t_i)$ 来描述,则根据可靠度指标定义 $P_f = \Phi(-\beta)$ 有

$$\beta(t_i) = -\Phi^{-1}(P_{\beta_i}) \quad (22)$$

应该指出的是,这里的时变可靠性指标 $\beta(t_i)$ 仅仅是借用了基于设计基准期可靠性指标的定义,与其实际含义是不同的^[15]。

4 蒙特卡洛抽样法(MCS)

一般地,式(15)采用直接积分的方法很难被计算出来,随着计算机技术的发展,蒙特卡洛模拟(Monte Carlo simulation, MCS)方法越来越多地用于计算此类问题。MCS的原理是:对工程结构的抗力与荷载效应进行多次抽样,这样得到多个结构状态,然后将 $Z < 0$ 的状态进行统计,即计算失效的次数占抽样总次数的比值为结构的失效概率。本文采用 MCS 方法计算基于双随机过程的时变可靠度计算。MCS 方法的计算步骤为:

- 1) 随机抗力初始值 R_0 的样本;
- 2) 寿命基准期 T_L 内可以分为 L 个时间长度为 τ 的相等的时间段,时间段序列为 $(0, t_1), (t_1, t_2), \dots, (t_{L-1}, t_L)$;
- 3) 对每一段时间序列 (t_{i-1}, t_i) 生成一个均值为 $\lambda \tau$ 的泊松数 n ,然后生成 n 个在时间序列 (t_{i-1}, t_i) 均匀,独立分布的时刻 $t_j, j=1, \dots, n$;
- 4) 对应 $t_j, j=1, \dots, n$ 时刻,随机生成荷载效应样本值 S_{ij} 及抗力样本值 $R_0 G(t_{ij})$;
- 5) 若对抽取的 S_{ij} 与 $R_0 G(t_{ij})$ 均满足 $R_0 G(t_{ij}) \geq S_{ij}$,则说明结构安全,否则结构失效;
- 6) 重复以上步骤 M 万次,其中结构有效的次数记为 n_s ,则 $P_{Si} = \frac{n_s}{M}$ 。则服役寿命期内的结构失效概率: $P_f(T_L) = 1 - \prod_{i=1}^L P_{Si}$ 。

本文采用的改进的时变可靠度 Monte Carlo 计

算方法与传统的时变可靠度计算方法相比,增加了第2步与第3步,这样做的目的是将计算期的每个阶段随机划分为 N 段,然后计算每一段的失效概率,进而计算整个计算周期内的失效概率。

5 算例分析

算例 1: 本文算例来自于文献[16],工程概况: 某现服役钢筋混凝土梁式桥,其横断面如图 7 所示。主梁为 T 型截面。梁混凝土等级为 C30,钢筋等级为二级钢(HRB335),跨径为 15.5 m。

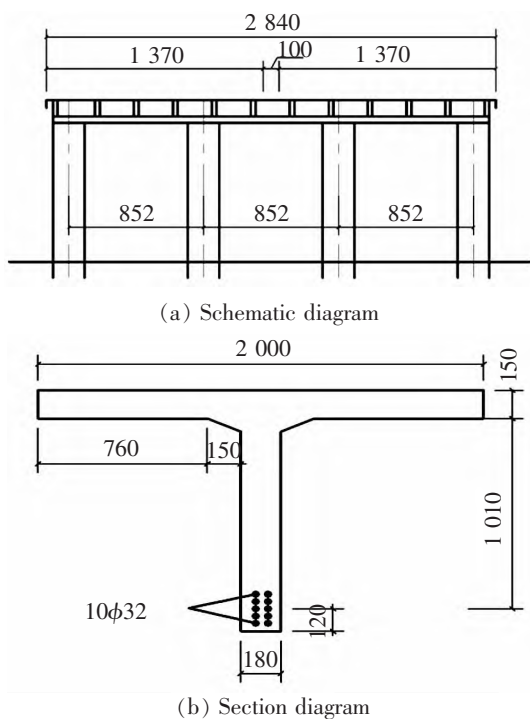


图 2 某桥梁断面^[16](单位:cm)

Fig.2 Cross section of an illustrative bridge^[16](Unit:cm)

依据《公路桥梁承载能力检测评定规程》,考虑桥梁结构随时间退化,可评估出上述桥梁结构当前实际承载能力(抗力), R_0 为 2 530 kN·m。考虑到 R_0 的不确定性,根据 Ellingwood^[17]的研究,抗力 R_0 服从对数正态分布,其变异系数为 0.15。本算例跨中截面最大弯矩(荷载效应)的均值和标准差分别为 1 020 kN·m 和 240 kN·m。

为验证本方法的有效性,采用与文献[16]一样的抗力退化模型。即 Enright^[18]的混凝土抗力退化的确定性模型

$$g(t)=1-k_1t+k_2t^2 \quad (14)$$

$$R(t)=R_0g(t) \quad (15)$$

式中: k_1,k_2 为承载力退化速度; t 为退化时间, a ; k_1,k_2 取值表示不同退化速率模型,如下所示

$$\begin{cases} k_1=0.0005, k_2=0, T=10 \text{ a} & \text{慢速退化} \\ k_1=0.005, k_2=0, T=5 \text{ a} & \text{中速退化} \\ k_1=0.01, k_2=0.00005, T=2.5 \text{ a} & \text{快速退化} \end{cases} \quad (16)$$

式中: T 为起始退化时间, a 。慢速退化模型与中速退化模型为线性回归模型,快速退化模型为非线性模型。当退化 $T=20 \text{ a}$ 时,基于慢速、中速、快速三种退化情形分别计算该桥梁时变可靠度,计算得到的失效概率、可靠度 β 与时间的关系如图 3 所示。从图 3 中可见,改进的 MC 方法与文献[18]的 MC 方法的计算结果吻合很好。以慢速退化退化机制下的 $T=20 \text{ a}$ 时的可靠度指标为例,本文方法: $\beta(20)=2.0937$,传统方法: $\beta(20)=2.1187$,两者相差 1.18%,由此证明了本方法的准确性。并当改进的 MC 方法与普通的 MC 方法抽取次数均为

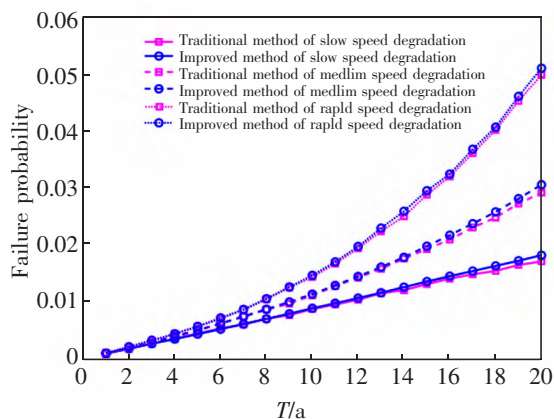


图 3 两种方法的各种退化模型失效概率

Fig.3 Failure probability of various degradation models of the two methods

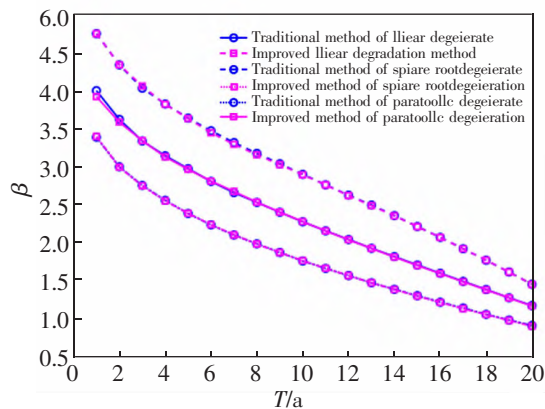


图 4 两种方法的各种退化模型可靠度

Fig.4 Reliability of various degradation models of the two methods

$n_s=10^6$ 时,3 种情况下,2 种方法所用时间如表 1 所示。

表 1 两种方法的计算时间
Tab.1 calculation time of two methods

Degradation mechanism	Improved method/s	Traditional method/s
Slow speed degradation	1 370	3 793
Medium speed degradation	1 395	3 830
Rapid speed degradation	1 285	3 803

从表 1 可以看出一般方法所用时间为本文方法所用时间近乎 4 倍,这体现了本方法的高效性。

算例 2:采用基于 Gamma 过程的抗力随机退化模型描述桥梁结构的抗力退化,如式(1)~式(5)所示,其中考虑三种抗力退化机制:腐蚀($\alpha=1$)、硫酸盐侵蚀($\alpha=2$)和扩散控制时效($\alpha=0.5$)。本算例采用服役期 20 a 后抗力劣化系数均值与上述快速退化机制下得一致,即为 $G(20)=0.82$ 。则取对于腐蚀机制引起的线性劣化($\alpha=1$),参数 $b=0.147$ 和 $k=0.061 2$ 。对于平方根恶化($\alpha=0.5$), $b=0.147,k=0.274$,对于抛物线退化($\alpha=2$), $b=0.147,k=0.003 06$;对于以上 3 种退化机制,分别计算该桥梁的失效概率、可靠度 β 与时间的关系,并与传统的时变可靠度计算方法进行对比,如图 5,图 6 所示。

从图 5,图 6 中可见,改进的时变可靠度计算方法与传统的计算方法的结果吻合很好。以抛物线退化机制下的 $T=20$ a 时的可靠度指标为例,本文方法: $\beta(20)=0.952 2$,传统方法: $\beta(20)=0.935 9$,两者相差 1.7%,由此证明了本方法的准确性。并当本文方法与传统的时变可靠度计算方法抽取次数均为 $n_s=10^6$ 时,3 种情况下,2 种方法所用时间如表 2 所示。

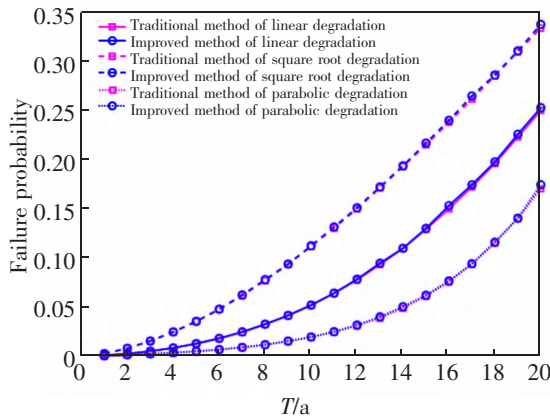


图 5 两种方法的各种退化模型失效概率
Fig.5 Failure probability of various degradation models of the two methods

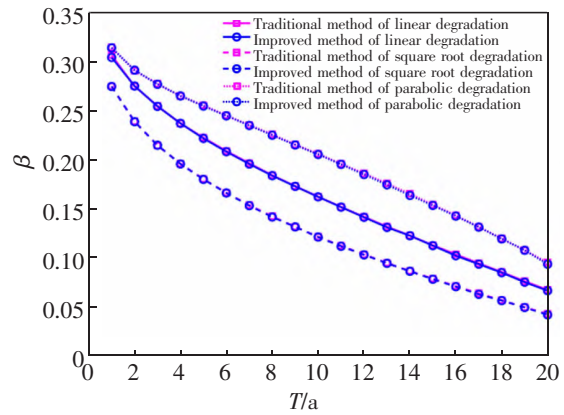


图 6 两种方法的各种退化模型可靠度
Fig.6 Reliability of various degradation models of the two methods

表 2 2 种方法的计算时间
Tab.2 calculation time of two methods

Degradation mechanism	Improved method/s	Traditional method/s
Linear degradation	1 159	5 639
Parabolic degeneration	1 889	7 064
Square root degeneration	1 731	6 000

从表 2 可以看出普通的时变可靠度方法所用时间为本文方法所用时间近乎 4 倍甚至更多,这体现了本方法的高效性。

另外,我们可以对该桥梁的失效概率与可靠指标做出预测。以腐蚀机制下的桥梁抗力退化模型为例,预测得到桥梁在后 30 a 的失效概率以及可靠指标,如图 7,图 8 所示。并将 $T=30,40,50$ a 时的预测失效概率与可靠指标列于表 3 中。

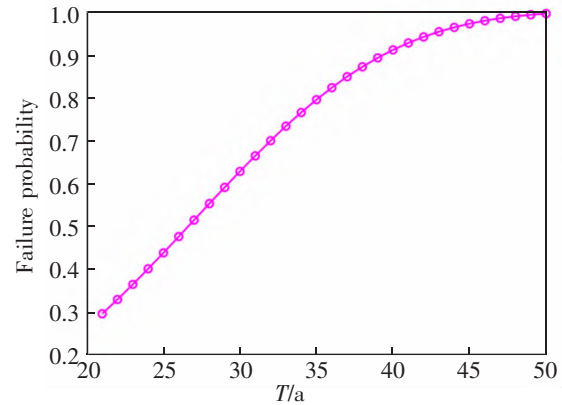


图 7 腐蚀机制下的桥梁预测失效概率
Fig.7 predicted failure probability of bridge under corrosion mechanism

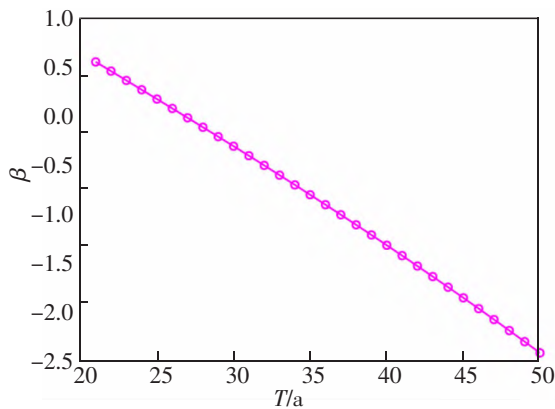


图8 腐蚀机制下的桥梁预测可靠指标

Fig.8 predicted reliability index of bridge under corrosion mechanism

表3 预测腐蚀机制下的桥梁时变可靠度

Tab.3 Prediction of time-varying reliability of bridges under corrosion mechanism

T/a	Failure probability	Reliability index
30	0.627 1	-0.324 1
40	0.908 2	-1.329 8
50	0.992 3	-2.423 1

从图7,图8,表3中可以看出,可以在既有结构的基础上,建立抗力的随机过程模型,并利用该方法对桥梁结构的失效概率与可靠指标进行预测。

6 结论

本文的一个主要工作是构建了一个适用于实际工程,考虑抗力-荷载双随机过程的理论模型,并基于抗力和荷载效应相互独立的基本假定,使用条件概率公式,严格得到了结构失效概率计算表达式。进而提出了基于抗力-荷载双随机过程模型的改进的时变可靠度计算方法。该方法将计算期的每个阶段随机划分为 N 段,然后计算每一段的失效概率,进而计算整个计算周期内的失效概率。使用该方法计算了某现役钢筋混凝土梁式桥20a在2种不同抗力退化模型下以及预测腐蚀机制退化模型的后30a时的失效概率可靠度。通过计算与分析,得到以下结论。

1) 本方法可计算荷载与抗力均为随机过程的时变可靠度,算例表明了本方法的准确性与高效性。利用该方法给出的可靠度计算结果与普通方法给出的“精确”相比误差不超过1%,但计算时间仅

为普通方法的1/5~1/3,且当桥梁使用期限越长时,该方法的高效性越显著。

2) 本文将荷载效应与各个时间点上的抗力退化均描述为是相互独立的。但事实上,抗力退化过程本身,荷载之间,荷载与抗力之间是相关的。如何考虑它们之间的相关性,拟作为下一步研究的重点。

参考文献:

- [1] JIANG Y, SINHA K C. Bridge service life prediction model using the Markov chain[J]. Transportation Research Record, 1989, 1223: 24-30.
- [2] FRANGOPOL D M, MAUTE K. Life-cycle reliability-based optimization of civil and aerospace structures[J]. Computers & Structures, 2003, 81(7): 397-410.
- [3] FRANGOPOL D M, KALLEN M J, NOORTWIJK J M. Probabilistic models for life-cycle performance of deteriorating structures: review and future directions[J]. Progress in Structural Engineering and Materials, 2004, 6(4): 197-212.
- [4] GIORGIO B, FRANGOPOL D M. Life-cycle maintenance of deteriorating structures by multiobjective optimization involving reliability, risk, availability, hazard and cost[J]. Structural Safety, 2014, 48: 40-50.
- [5] 彭建新, 张建仁, 张克波, 等. 锈蚀RC桥梁弯曲抗力时变概率模型与试验研究[J]. 工程力学, 2012, 29(6): 125-132. PENG J X, ZHANG J R, ZHANG K B, et al. Time varying probability model and experimental study on bending resistance of corroded RC bridges[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(6): 125-132.
- [6] 张建仁, 胡守旺, 彭建新. 在役钢筋混凝土桥梁退化机理、可靠性评估及维修策略多目标优化[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2013, 32(6): 1123-1127. ZHANG J R, HU S W, PENG J X. Degradation mechanism, reliability assessment and multi objective optimization of maintenance strategy of existing reinforced concrete bridges [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2013, 32(6): 1123-1127.
- [7] WANG C, LI Q W, ZOU A M, et al. A realistic resistance deterioration model for time-dependent reliability analysis of aging bridges[J]. Journal of Zhejiang University Science A (Applied Physics & Engineering), 2015, 16(7): 513-524.
- [8] 王草, 李全旺. 考虑非平稳车载过程的在役桥梁时变可靠度分析[J]. 工程力学, 2016, 33(3): 18-23. WANG C, LI Q W. Time dependent reliability analysis of

- existing bridges considering non-stationary vehicle loading process[J]. *Engineering mechanics*,2016,33(3):18-23.
- [9] 李全旺,王草,张龙. 考虑结构劣化和荷载历史的既有桥梁承载力更新[J]. *清华大学学报(自然科学版)*,2015,55(1):8-13.
- LI Q W,WANG C,ZHANG L. Bearing capacity updating of existing bridges considering structural deterioration and load history[J]. *Journal of Tsinghua University (Natura Science Edition)*,2015,55(1):8-13.
- [10] YUAN Y G, HAN W S, LI G L, et al. Time-dependent reliability assessment of existing concrete bridges including non-stationary vehicle load and resistance processes[J]. *Engineering Structures*,2019,197:109426.
- [11] 袁阳光,韩万水,谢青,等. 非平稳车载及抗力劣化进程中混凝土桥梁时变可靠性评估[J]. *中国公路学报*,2020,33(3):85-96.
- YUAN Y G, HAN W S, XIE Q, et al. Time-dependent reliability assessment of concrete bridges considering non-stationary vehicle load and resistance deterioration processes[J]. *China Journal of Highway and Transport*,2020,33(3):85-96.
- [12] 陈梦成,杨超,方苇,等. 徐变作用下混凝土结构力学行为的 ANSYS 分析[J]. *华东交通大学学报*,2019,36(2):1-7.
- CHEN M C, YANG C, FANG W, et al. Ansys analysis of mechanical behavior of concrete structure under creep[J]. *Journal of East China Jiaotong University*,2019,36(2):1-7.
- [13] MORI Y, ELLINGWOOD B R. Reliability-based service-life assessment of aging concrete structures[J]. *Journal of Structural Engineering*,1993,119(5):1600-1621.
- [14] 王茜. 基于时变可靠度的桥梁结构安全状态评估方法[D]. 重庆:重庆大学,2016.
- WANG Q. Bridge structure safety state assessment method based on time-varying reliability[D]. Chongqing:Chongqing University,2016.
- [15] 张建仁,秦权. 现有混凝土桥梁的时变可靠度分析[J]. *工程力学*,2005,22(4):90-95.
- ZHANG J R, QIN Q. Time varying reliability analysis of existing concrete bridges[J]. *Engineering Mechanics*,2005,22(4):90-95.
- [16] 叶新一,王草,李全旺. 桥梁结构时变可靠度计算的新方法[J]. *工程力学*,2018,35(11):86-91.
- YE X Y, WANG C, LI Q W. New method for calculating of time-dependent reliability of RC bridges[J]. *Engineering Mechanics*,2018,35(11):86-91.
- [17] ELLINGWOOD B. Development of a probability based load criterion for American National Standard A58:Building code requirements for minimum design loads in buildings and other structures[M]. Washington D.C:US Department of Commerce,National Bureau of Standards,1980.
- [18] ENRIGHT M P,FRANGOPOL D M. Condition prediction of deteriorating concrete bridges using Bayesian updating[J]. *Journal of Structural Engineering*,1999,125(10):1118-1125.



第一作者:陈梦成(1962—),男,教授,博士,华东交通大学副校长,研究方向为混凝土结构耐久性。E-mail:919367042@qq.com。



通信作者:张明阳(1987—),男,博士研究生,研究方向为混凝土结构耐久性。E-mail:527758319@qq.com。

(责任编辑:姜红贵)