

文章编号:1671-8879(2018)06-0155-10

基于可靠度的桥梁船撞作用荷载组合分项系数

周 救¹, 赵 威¹, 温 杰², 姜永存¹

(1. 长安大学 旧桥检测与加固技术交通行业重点实验室, 陕西 西安 710064;

2. 广东江中高速公路有限公司, 广东 中山 528414)

摘 要:对船撞偶然组合问题, 现行的桥梁设计规范给出了相应的组合分项系数。为了分析现行规范给出的分项系数下桥梁结构可靠度指标水平, 寻求荷载组合分项系数与桥梁结构可靠度指标之间的关系, 需要对桥梁船撞偶然荷载组合进行深入研究。基于有限元-神经网络-Monte Carlo(F-A-M)法和极限状态设计法, 计算桥梁结构船撞偶然组合不同荷载分项系数下的可靠度指标。以练江 1 号桥主桥为依托工程, 采用有限元软件建立全桥空间有限元动力模型, 以荷载冲击谱模拟船撞桥墩的动力时程, 塔克斯特拉准则作为荷载组合理论依据, 确定船撞荷载与汽车荷载作用下结构的失效模式。提取船撞荷载与荷载效应样本、汽车荷载与荷载效应样本、船撞和汽车荷载组合与荷载效应样本, 对这些样本进行 BP 神经网络训练, 当训练结果满足精度要求时, 对船撞荷载分项系数 ψ_{c_v} 取 1.0, 汽车荷载分项系数 ψ_{L_L} 分别取 0.5、0.6、0.7、0.8、0.9、1.0, 并采用 Monte Carlo 法计算各分项系数下桥梁结构的失效概率和可靠度指标, 将不同分项系数下的可靠度指标与目标可靠度指标进行比较。研究表明: 跨径在 150 m 以内的连续刚构桥荷载组合分项系数 ψ_{c_v} 、 ψ_{L_L} , 建议其值为 1.0、0.8; F-A-M 法可以方便、快速地求解桥梁结构船撞偶然组合下的可靠度指标, 建立可靠度指标 β 与船撞荷载分项系数 ψ_{c_v} 、汽车荷载分项系数 ψ_{L_L} 的影响面关系, 并给出荷载分项系数建议值, 为船撞偶然组合设计及桥梁船撞的风险评估提供依据。

关键词:桥梁工程; 桥梁船撞; 塔克斯特拉准则; F-A-M 法; 可靠度指标; 分项系数

中图分类号: U441.2

文献标志码: A

Combined partial coefficient of ship-bridge collision loads based on reliability

ZHOU Mi¹, ZHAO Wei¹, WEN Jie², JIANG Yong-cun¹

(1. Key Laboratory of Old Bridge Detection and Reinforcement Technology of Ministry of Transportation,

Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Guangdong River Highway Co., Ltd.,

Zhongshan 528414, Guangdong, China)

Abstract: For accidental ship collisions, the existing bridge design code has used the corresponding partial coefficient of combination. In order to analyze the reliability index level of the bridge structure under the partial coefficient given by the current specification, and find the relationship between load combination partial coefficient and bridge structural reliability index, it

收稿日期: 2018-05-20

基金项目: 陕西省创新人才推进计划项目(2018-TD-040); 陕西省交通运输厅科技计划项目(15-2-06);

陕西省交通科技项目(15-19K); 研究生卓越人才培养计划项目(310621116603);

中央高校基本科研业务费专项资金项目(310821163305)

作者简介: 周 救(1977-), 男, 陕西商州人, 副教授, 工学博士, E-mail: zhoumi@chd.edu.cn.

was necessary to study the accidental load combination of bridge-ship collision in depth. Based on a finite element-neural network-Monte Carlo method and limit state design method, the reliability index of a bridge structure under different load partial coefficients was calculated. Taking the No. 1 Lianjiang Bridge as the main bridge supporting project, finite element software was used to establish the full-bridge space finite element dynamic model, and the load shock spectrum was used to simulate the dynamic time history of a ship colliding with a pier. Turkstra's principle was served as a theoretical basis for the load combination to determine the failure mode of the structure under ship impact and vehicle loads. The load and load effect samples of the ship collision, the vehicle, and the combination of ship collision and vehicle were extracted, and the BP neural network was trained on these samples. When the training results met the accuracy requirements, the partial coefficient ψ_{c_v} of the ship impact load was taken as 1.0, and the partial factor ψ_{L_L} of the vehicle load was taken as 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, and 1.0. The Monte Carlo method was used to calculate the failure probability and reliability index of the bridge structure under different partial coefficients, the reliability index under different partial coefficients and the target reliability index were compared. The results show that a ship collision load partial coefficient is 1.0 and a vehicle load partial coefficient is 0.8, which obtained from a continuous rigid-frame bridge with a span of less than 150 m. The finite element-neural network-Monte Carlo method can quickly and easily solve the reliability index of the bridge structure with accidental ship collision, and establish the relationship between the reliability index β , ship collision load partial coefficient ψ_{c_v} , and the vehicle load partial coefficient ψ_{L_L} . The suggested value of the load component coefficient is also given. This method provides a basis for the accidental-ship-collision combination design and the risk assessment of bridge-ship collisions. 9 tabs, 11 figs, 24 refs.

Key words: bridge engineering; ship bridge collision; Turkstra's principle; F-A-M method; reliability index; partial coefficient

0 引言

日益增加的水上交通和陆上交通,使得船桥碰撞与重载车辆过桥相遇的概率逐渐增大。因此对船撞偶然组合设计及桥梁船撞的风险评估研究具有十分重要的意义。

目前国内外对船撞偶然组合及荷载组合分项系数研究已有大量成果。早期的相关桥梁规范中仅研究基本荷载的组合情况(主要是恒载与汽车荷载的组合),由于极端荷载数据的匮乏,船撞偶然组合的研究并未涉及。Ghosn 等对桥梁的极端荷载状况进行研究,归纳出 4 种极端荷载的组合(包括船撞偶然组合)系数,但是由于假设条件和计算样本数量等原因,其结果未得到广泛认可^[1]。Hida 也对多种极端荷载的组合问题进行了研究,但仅归纳出一些极端荷载的统计特性,并未基于可靠度对极端荷载状况下组合系数进行研究,也没有进行船撞偶然组合及荷载组合分项系数的研究^[2]。Lee 等进行基于概率的桥梁多灾害设计研究,并提出 MH-LRFD(多灾害

荷载抗力系数设计算法)设计理念^[3-7],其中包含船撞和卡车荷载的组合研究,但未给出具体的组合分项系数。2010 年美国 AASHTO LRFD 规范^[8]给出了极限 II 类组合情况,该组合考虑了 50% 的汽车荷载及 100% 的船撞荷载、冰荷载或汽车撞击荷载,即船撞偶然组合下,汽车荷载的分项系数为 0.5,船撞荷载的分项系数为 1.0。《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)^[9]中给出偶然作用(包含船撞作用)的分项系数为 1.0,汽车荷载采用频遇值或准永久值进行组合时的分项系数分别为 0.7 和 0.4,但未给出该组合系数下桥梁结构的可靠度指标水平。

为此,本文依托练江 1 号桥主桥,基于有限元-神经网络-Monte Carlo (F-A-M)法以及多灾害极限状态设计方法,分析桥梁结构船撞偶然组合下的可靠度指标,建立可靠度指标与分项系数的影响面关系;基于目标可靠度指标给出荷载分项系数建议值,并根据影响面关系确定现行规范中给出的分项系数所对应的可靠度水平,为船撞偶然组合设计及桥梁

船撞的风险评估提供依据。

1 基于 F-A-M 法的桥梁船撞荷载组合分项系数

结构可靠度的功能函数是由结构的抗力变量和荷载效应变量构成的,对结构进行有限元分析后,可以得到结构在船撞荷载下的响应值。通过有限次的结构有限元分析,无法获得船撞荷载控制变量(船舶吨位 D , 船撞击速度 V)与船撞荷载效应变量间的映射关系,因此无法确定功能函数和结构失效概率。本文采用 F-A-M 方法计算可靠度,可以在有限元法计算出有限的船撞荷载效应样本情况下,通过神经网络的学习与检验;当检验误差足够小时,即可用神经网络建立船撞荷载控制变量与船撞荷载效应变量间的映射关系,代替结构有限元的计算,得到更多的极限状态功能函数值,从而为 Monte Carlo 法提供足够的船撞荷载效应样本,最终能更方便快捷地计算结构可靠度^[10]。

1.1 BP 神经网络模型

本文利用 BP 神经网络^[11]原理,对有限的船撞荷载控制变量与船撞荷载效应样本进行不断学习和检验,当检验的误差足够小时,表明该神经网络建立的船撞荷载控制变量与船撞荷载效应变量间的映射关系^[12]具有足够的可信度,并能为 Monte Carlo 法计算失效概率提供足够多的样本。

1.2 Monte Carlo 法及其在 MATLAB 环境下的实现

采用 Monte Carlo 法,根据船撞荷载控制变量的概率分布情况随机生成大量的荷载样本,然后将荷载样本输入训练好的神经网络中,即可由已建立的荷载-荷载效应之间的映射关系,获得大量的船撞荷载效应样本。将荷载效应样本带入功能函数,记录失效的次数,当随机生成的样本次数趋于无穷大时,记录的失效次数与随机样本总次数比值,即为结构的失效概率^[13-14]。Monte Carlo 法求解结构可靠指标或失效概率的过程如下。

(1)根据船撞荷载控制变量的概率分布情况随机生成大量的船撞荷载样本 $D_1, D_2, \dots, D_i, V_1, V_2, \dots, V_i$ 。其中: D_i 为随机生成的第 i 个船舶吨位样本; V_i 为随机生成的第 i 个船撞击速度样本。

(2)由已建立的船撞荷载控制变量与船撞荷载效应变量间的映射关系,可求得船撞荷载的效应样本 S_1, S_2, \dots, S_i 。其中, S_i 为 D_i 和 V_i 下的船撞荷载效应样本。

(3)计算每组船撞荷载效应对应的功能函数值 $Z_i, Z_i = g(S_i)$ 。其中, Z_i 为 S_i 下的功能函数值。

(4)随机抽样总次数为 N , 每组抽样值对应的功能函数值为 $Z_i, Z_i < 0$ 的次数为 n_f , 则当抽样次数足够大时,结构失效概率 P_f 可表示为

$$P_f = n_f / N \quad (1)$$

相应的结构可靠度指标 β 为

$$\beta = \Phi^{-1}(1 - P_f) \quad (2)$$

式中: $\Phi(\cdot)$ 为标准正态分布函数。

1.3 目标可靠度的确定

对中国公路桥梁船撞及船撞作用荷载组合的目标可靠度,本文参考耿波^[15]的研究结果,取年目标失效概率为 5×10^{-5} , 对应的目标可靠度指标 β 为 3.89。该可靠度指标略大于 AASHTO 桥梁船撞设计指南^[16]中规定重要桥梁的船撞目标可靠度指标,其对应的失效概率处于社会可接受风险水平之间,稍高于个人可接受风险水平,满足《公路工程结构可靠度设计统一标准》(GB/T 50283—1999)^[17]规定的目标可靠度要求。

1.4 船撞荷载组合分项系数的确定

根据 AASHTO 船撞概率模型与 3 参数路径积分方法^[16,18-19], 计算船撞桥墩概率的表达式,并确定该桥主墩船舶年撞击频率;提取船撞荷载与荷载效应样本、汽车荷载与荷载效应样本、船撞汽车荷载组合与荷载效应样本,对这些样本进行 BP 神经网络训练,训练结果需满足精度要求;由 Monte Carlo 法计算失效概率,对船撞荷载分项系数 ϕ_{C_V} 取 1.0, 汽车荷载分项系数 ϕ_{L_L} 分别取 0.5、0.6、0.7、0.8、0.9、1.0, 计算各分项系数下荷载组合的失效概率和可靠度指标,并与目标可靠度指标比较,得出建议的船撞荷载与汽车荷载组合时的分项系数取值。

2 实桥应用

2.1 工程背景

练江 1 号桥主桥为 37.5 m + 68 m + 68 m + 37.5 m 的四跨连续刚构桥。上部结构形式为预应力混凝土箱梁,主梁采用 C55 混凝土,截面形式为单箱单室直腹板箱梁,箱梁顶板宽度为 12.5 m,底板宽度为 6.2 m,墩顶根部梁中心高 4.2 m,跨中及边跨现浇段梁中心高 2.0 m,其间梁高按 2 次抛物线变化。主墩(2 号~4 号)形式为薄壁空心墩,过渡墩(1 号、5 号)形式为柱式墩。主墩采用钢筋混凝土箱形截面,过渡墩采用双柱式矩形柱式墩,主墩基础采用钢管复合桩基础,按支承桩设计,钢管与钢筋混

凝土共同组成桩基础结构主体共同受力。

2.2 全桥有限元模型建立

有限元软件建立的全桥模型见图 1。模型以纵桥向为 X 轴,横桥向为 Y 轴,竖桥向为 Z 轴。主梁、墩柱均采用空间的梁单元,承台采用面单元模拟。抗拉抗震球形支座采用线弹性单元模拟,可正确反映支座的力学特性;由于采用了桩柱式基础和群桩基础,因此采用分层土弹簧模型模拟桩土效应。



图 1 全桥有限元模型
Fig. 1 Full-bridge finite element model

2.3 失效模式的确定

2.3.1 船撞荷载

《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)规定内河船舶的撞击作用点^[9],假定为计算通航水位线以上 2 m 的桥墩宽度或长度的中点。练江 1 号桥最高通航水位 3.01 m,选择撞击点标高为 4.5 m,撞击点距承台顶 5.7 m,故该有限元动力分析模型中,在 3 号主墩距承台顶高 5.7 m 处的桥墩节点上,沿横桥向方向施加船撞力。

潮汕(潮州—汕头)环线高速公路船撞设防标准及结构船撞安全性评价研究中^[20],计算了练江 1 号桥在船舶吨位 D 为 300 t、撞击速度 V 为 3 m/s 的碰撞力时程曲线,此工况下撞击力较小。为了凸显桥梁在船撞荷载下的失效截面位置及失效模式,本文选取 $D=300\text{ t}$ 、 $V=8\text{ m/s}$ 的碰撞力时程曲线,撞击桥墩。提取潜在危险截面的内力响应,通过对比分析判断船舶撞击作用下该桥梁结构的失效截面位置及失效模式。模型中船舶撞击力示意如图 2 所示,船舶撞击力时程曲线如图 3 所示。

2.3.2 船撞荷载下结构动态响应

确定船撞危险截面位置^[21-22],对计算后的该连续刚构桥 CSI Bridge 模型进行内力提取,得到墩底、撞击点、桩顶、桩顶下 2 m 的时间-内力曲线,如图 4~图 7 所示。

通过 Ucyber 软件对桥梁钢筋混凝土墩柱关键截面进行弯矩曲率分析,计算出各截面的抗弯能力值,并验算 3 号墩底、桩顶与撞击点截面抗弯能力。

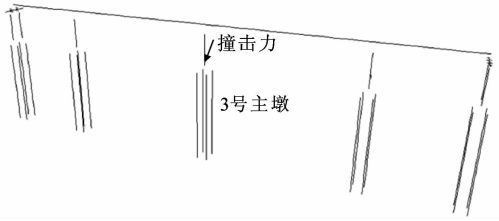


图 2 3 号主墩施加船舶撞击力示意
Fig. 2 Schematic of imposing ship impact force on No. 3 main pier

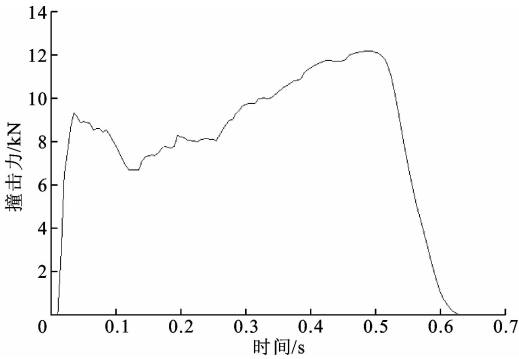


图 3 3 号主墩船舶撞击力时程曲线($D=300\text{ t}$, $V=8\text{ m/s}$)
Fig. 3 Time history curve of ship impact force on No. 3 main pier under ship tonnage 300 t and initial velocity 8 m/s

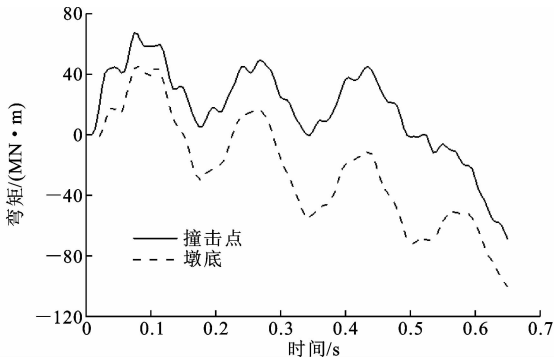


图 4 墩身横桥向弯矩时程曲线
Fig. 4 Transverse bending moment time curves of pier

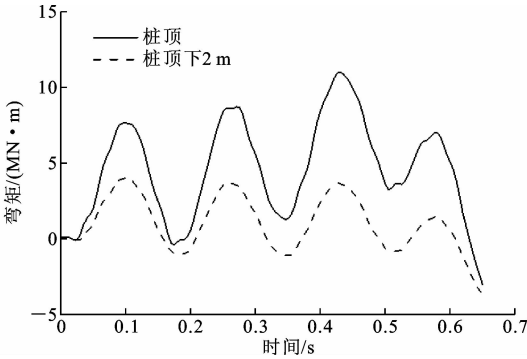


图 5 桩基横桥向弯矩时程曲线
Fig. 5 Transverse bending moment time curves of pile foundation

图 8 为 3 号墩墩底截面在轴力取 -51 174. 959 kN

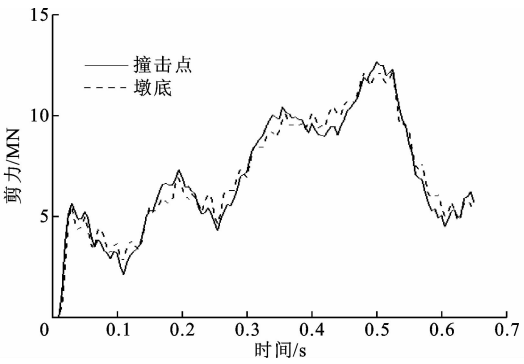


图 6 墩身横桥向剪力时程曲线

Fig. 6 Transverse shear time curves of pile

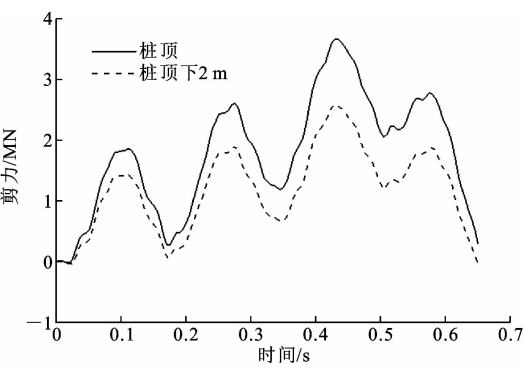


图 7 桩基横桥向剪力时程曲线

Fig. 7 Transverse shear time curves of pile foundation

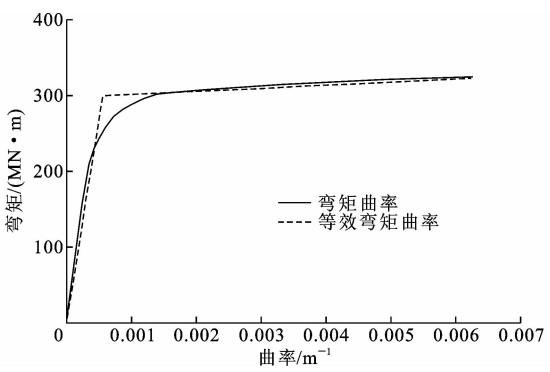


图 8 3 号墩墩底截面横桥向弯矩曲率曲线

Fig. 8 Transverse bridge moment-curvature curves of No. 3 pier bottom section

时的横桥向弯矩曲率曲线。表 1 为各截面抗弯强度验算,表 2 为桥墩墩柱截面抗剪强度验算。表中 Q_1 、 Q_2 分别为抗弯、抗剪能力与需求的比值,其值越大表示安全裕度越大。

对于该桥在船撞荷载下的失效模式可以判别为墩底弯矩破坏或撞击点剪切破坏。因此在与汽车荷载的组合中,对墩底与撞击点位置分别进行抗弯和抗剪验算,以墩底弯矩临界值或撞击点剪力临界值作为结构的极限状态。

表 1 3 号桥墩各截面抗弯强度验算
Tab. 1 No. 3 pier section of resist bending moment strength checking

| 截面位置 | 墩底弯矩 (恒载+动载)/(kN·m) | 首次屈服弯矩/ (kN·m) | 等效屈服弯矩/ (kN·m) | 极限弯矩/ (kN·m) | Q_1 | 验算结果 |
|------|------------------------|-------------------|-------------------|-----------------|--------|------|
| 墩底 | 100 727. 137 | 211 800 | 297 300 | 327 200 | 2. 95 | 通过 |
| 桩顶 | 11 341. 514 | 134 200 | 178 700 | 219 000 | 19. 31 | 通过 |
| 撞击点 | 69 102. 321 | 208 100 | 292 800 | 323 500 | 4. 24 | 通过 |

表 2 3 号桥墩墩柱截面抗剪强度验算
Tab. 2 No. 3 pier section of the resist shear strength checking

| 剪力验算位置 | 剪力需求/kN | 抗剪能力/kN | Q_2 | 验算结果 |
|---------|-------------|---------|--------|------|
| 墩顶 | 6 697. 474 | 116 435 | 17. 38 | 通过 |
| 撞击点 | 12 642. 510 | 105 935 | 8. 38 | 通过 |
| 墩底 | 12 219. 590 | 116 435 | 9. 53 | 通过 |
| 桩顶 | 3 664. 509 | 35 066 | 9. 57 | 通过 |
| 桩顶下 2 m | 2 590. 026 | 35 066 | 13. 54 | 通过 |

2.4 船撞荷载 C_v 下结构失效概率 P_f^C

2.4.1 船舶撞击力 F 的概率分布

由统计可知 D 、 V 的近似概率分布为: $D \sim N(600, 160^2)$, $V \sim N(6. 57, 1. 49^2)$ 。因此需考虑船舶撞击力 F 与 D 、 V 的关系,确定其概率分布。

根据各国规范中船舶撞击力计算公式可知,船舶撞击力 F 与 D 的 0. 5 次方成正比,与 V 成正比。为减少样本数量,引入表示撞击力 F 的量纲一变量 ξ

$$\xi=f(V,D)=V\sqrt{D} \tag{3}$$

令 $x=\sqrt{D}$,则 x 的概率密度函数 $f_x(x)$ 为

$$f_x(x)=\begin{cases} f_D(x^2)2x=\frac{x\mathrm{e}^{-(x^2-600)^2/51\,200}}{200} & x\geqslant 0 \\ 0 & x<0 \end{cases} \tag{4}$$

x 的概率分布函数 $F_x(x)$ 为

$$F_x(x)=\frac{1}{200}\int_0^x x\mathrm{e}^{-(x^2-600)^2/51\,200}\mathrm{d}x \tag{5}$$

式中: f_D 为船舶吨位 D 的概率密度函数。

对 $x=\sqrt{D}$ 进行当量正态化,得到: $\sqrt{D} \sim N(24. 03, 0. 5^2)$, 则 $f(V,D)$ 服从二维正态分布

$$f(V,D)\sim N(6. 57, 24. 03, 1. 49^2, 0. 5^2, 0) \tag{6}$$

随机变量 D 、 V 的联合概率密度图如图 9 所示。

F 与 D 、 V 相关,且与 $V\sqrt{D}$ 值成正比,因此在撞击力时程曲线获取时,计算 D 、 V 下的 ξ 值,并求出该 ξ 值与 $D=300\text{ t}$ 、 $V=8\text{ m/s}$ 下的 ξ_0 值之比;将该状况下的撞击力时程曲线按比值 ξ/ξ_0 进行相应地放大或缩小,便可得到不同 D 、 V 情况下的撞击力时程曲线。

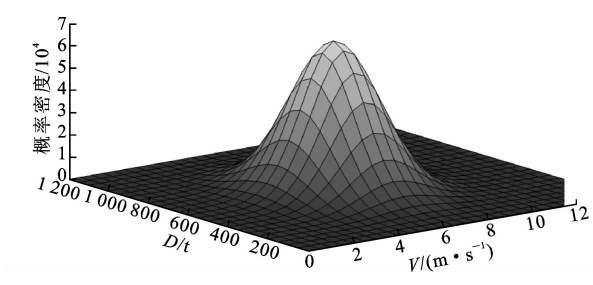


图9 随机变量 D 与 V 的联合概率密度

Fig. 9 Joint probability density of random variables D and V

表 3 为不同 D 、 V 下 $f(V,D)$ 的取值。随机抽取 $f(V,D)$ 中数据组成矩阵 $\boldsymbol{M} = [0\ 25\ 50\ 75\ 100$

表 3 不同变量 D 、 V 下的 $f(V,D)$ 取值

Tab. 3 Values of $f(V,D)$ under different variables D and V

| D/t | 不同 $V(m \cdot s^{-1})$ 下的 $f(V,D)$ | | | | | | | | | | | | | |
|-------|------------------------------------|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| 25 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 | 55 | 60 | 65 | 70 |
| 100 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 110 | 120 | 130 | 140 |
| 225 | 15 | 30 | 45 | 60 | 75 | 90 | 105 | 120 | 135 | 150 | 165 | 180 | 195 | 210 |
| 400 | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 | 120 | 140 | 160 | 180 | 200 | 220 | 240 | 260 | 280 |
| 625 | 25 | 50 | 75 | 100 | 125 | 150 | 175 | 200 | 225 | 250 | 275 | 300 | 325 | 350 |
| 900 | 30 | 60 | 90 | 120 | 150 | 180 | 210 | 240 | 270 | 300 | 330 | 360 | 390 | 420 |
| 1 225 | 35 | 70 | 105 | 140 | 175 | 210 | 245 | 280 | 315 | 350 | 385 | 420 | 455 | 490 |

对有限元计算的样本,通过 BP 神经网络进行训练,墩底弯矩效应的训练次数 7 540,训练精度 1×10^{-5} ;撞击点剪力效应的训练次数 3 103,训练精度 1×10^{-5} 。通过训练可以求出任意随机变量 $f(V,D)$ 值对应的荷载效应值。代表训练效果的训练次数与均方误差关系如图 10 所示。检验样本的 BP 神经网络仿真结果与有限元计算结果对比如表 5、表 6 所示。由表 5、表 6 可以看出,BP 神经网络的训练精度很高,误差很小,可将此训练结果用于 Monte Carlo 法失效概率计算。

2.4.3 Monte Carlo 法求解失效概率

由钢筋混凝土结构构件抗力统计参数及 Ucfyber 软件计算结果可得出:墩底横桥向抗弯承载力值服从均值 364 549 kN·m、方差为 51 547² 的对数正态分布,撞击点横桥向抗弯承载力值服从均值 105 935 kN、方差为 305 41² 的对数正态分布,即 $\ln R_M \sim N(12.796\ 5, 0.140\ 7^2)$, $\ln R_V \sim N(11.530\ 7, 0.282\ 6^2)$ 。其中, R_M 、 R_V 分别为墩底横桥向抗弯承载力值和撞击点横桥向抗弯承载力值。

保存训练好的 BP 神经网络模型,以神经网络的泛化功能,利用 MATLAB 程序产生随机变量 $f(V,D)$ 与抗力 R 的随机数,带入训练好的 BP 神经网络模型中,便可计算出随机变量相对应的荷载效

125 150 175 200 225 250 275 300 325 350 375 400 425 450 475 500 550 600]^T,作为随机变量 D 、 V 的神经网络训练样本。

2.4.2 BP 神经网络训练

对 $f(V,D)$ 抽样,并将各样本所对应的船舶撞击力时程带入 CSI Bridge 有限元模型中,得出相对应的荷载效应。船舶撞击作用下最可能破坏的模式为墩底弯曲破坏和撞击点剪切破坏,因此样本选取的荷载效应取 3 号主墩墩底横桥向弯矩峰值与撞击点横桥向剪力峰值。训练样本如表 4 所示。

应 S ,与抗力 R 对比求出失效次数,利用大数定理,对船撞作用下桥梁失效概率进行计算。当抽样次数达到 5 000 万时,失效概率收敛,可知:以墩底弯曲破坏为失效模式的失效概率为 1.5×10^{-6} ;以撞击点剪切破坏为失效模式的失效概率为 4×10^{-8} 。

根据 AASHTO 船撞概率模型,可计算出船舶年撞击频率 $P_c(1) = 2.1$ 次。将船撞年频率与单次船撞下结构的失效概率相乘,便可得到结构的年失效概率 P_f^c ,即一年内,以墩底弯曲破坏为失效模式的 P_f^c 为 3.15×10^{-6} ;以船舶撞击点剪切破坏为失效模式的 P_f^c 为 8.4×10^{-8} 。失效概率与目标可靠度对比如表 7 所示。

2.5 汽车荷载 L_L 下结构失效概率 P_f^L

取重车荷载 350~850 kN 范围为研究对象,重车荷载服从均值 449.13 kN、方差为 154.62² 的正态分布;将重车荷载下的车道荷载分别加入到该桥 CSI Bridge 有限元模型中,得到 3 号主墩墩底弯矩峰值和撞击点剪力峰值,如表 8 所示。表 8 中, q_k 、 P_k 分别为车道分布荷载和集中荷载。

由表 8 可以发现,墩底弯矩峰值与撞击点剪力峰值均远小于抗力值,可以认为仅在汽车荷载 L_L 作用下,荷载效应与荷载值近似看作线性关系,通过线性拟合可得出汽车荷载 L_L 的荷载效应 $S_M^L \sim$

表 4 船舶撞击作用下神经网络学习样本

Tab. 4 Neural network learning samples under influence of ship collision

| 样本编号 | 随机变量 ξ | C _v 单独作用下荷载峰值(横桥向) | |
|------|------------|-------------------------------|----------------|
| | | 墩底弯矩效应/ (kN·m) | 撞击点剪力 效应/kN |
| 1 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 25 | 18 042. 233 | 2 289. 151 |
| 3 | 50 | 36 325. 426 | 4 535. 026 |
| 4 | 75 | 54 426. 409 | 6 802. 005 |
| 5 | 100 | 72 527. 392 | 9 068. 984 |
| 6 | 125 | 90 628. 376 | 11 335. 963 |
| 7 | 150 | 108 729. 359 | 13 602. 941 |
| 8 | 175 | 126 830. 342 | 15 869. 920 |
| 9 | 200 | 144 931. 326 | 18 136. 899 |
| 10 | 225 | 163 032. 309 | 20 403. 878 |
| 11 | 250 | 181 133. 293 | 22 670. 857 |
| 12 | 275 | 199 234. 276 | 24 937. 835 |
| 13 | 300 | 217 335. 259 | 27 204. 814 |
| 14 | 325 | 235 436. 243 | 29 471. 793 |
| 15 | 350 | 253 537. 226 | 31 738. 772 |
| 16 | 375 | 271 638. 210 | 34 005. 750 |
| 17 | 400 | 289 739. 193 | 36 272. 729 |
| 18 | 425 | 307 840. 176 | 38 539. 708 |
| 19 | 450 | 325 941. 160 | 40 806. 687 |
| 20 | 475 | 344 042. 140 | 43 073. 665 |
| 21 | 500 | 362 143. 130 | 45 340. 644 |
| 22 | 550 | 398 345. 090 | 49 874. 602 |
| 23 | 600 | 434 547. 060 | 54 408. 559 |

表 5 墩底弯矩效应神经网络仿真结果与有限元计算结果对比

Tab. 5 Neural network simulation results compared with finite element calculation results on pier bottom moment effect

| 检验样本 | 随机变量 ξ | 墩底弯矩峰值(横桥向)/(kN·m) | | 相对误差/% |
|------|------------|--------------------|---------|---------|
| | | 有限元计算值 | 神经网络输出值 | |
| 1 | 50 | 36 325. 426 | 36 280 | −0. 125 |
| 2 | 100 | 72 527. 392 | 72 530 | 0. 004 |
| 3 | 150 | 108 729. 359 | 108 640 | −0. 082 |
| 4 | 200 | 144 931. 326 | 144 790 | −0. 098 |
| 5 | 250 | 181 133. 293 | 181 100 | −0. 018 |
| 6 | 300 | 217 335. 259 | 217 350 | 0. 007 |
| 7 | 350 | 253 537. 226 | 253 580 | 0. 017 |
| 8 | 400 | 289 739. 193 | 289 600 | −0. 048 |
| 9 | 450 | 325 941. 160 | 325 030 | −0. 280 |
| 10 | 500 | 362 143. 130 | 361 610 | −0. 147 |
| 11 | 550 | 398 345. 090 | 399 250 | 0. 227 |
| 12 | 600 | 434 547. 060 | 428 640 | −1. 359 |

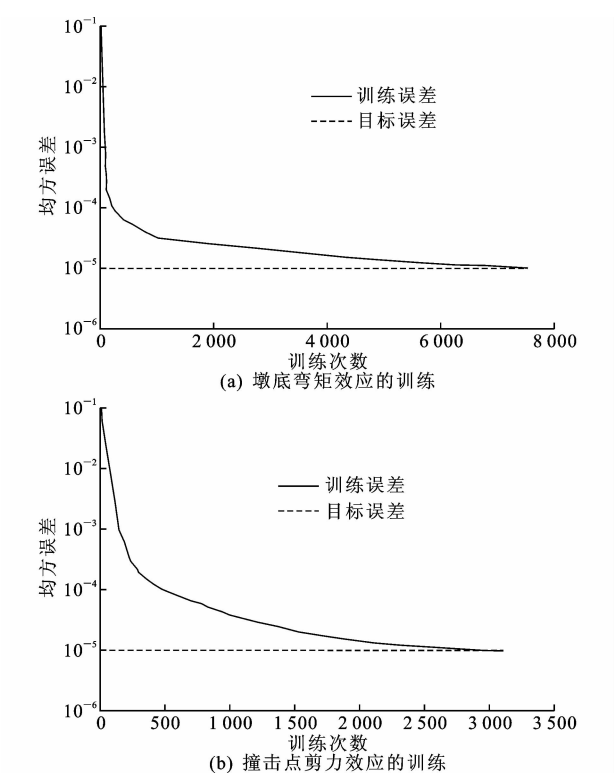


图 10 训练次数与均方误差的关系

Fig. 10 Relationships of training times and mean square errors

表 6 撞击点剪力效应神经网络仿真结果与有限元计算结果对比

Tab. 6 Neural network simulation results compared with finite element calculation results on impact point shear effect

| 检验样本 | 随机变量 ξ | 撞击点剪力峰值(横桥向)/kN | | 相对误差/% |
|------|------------|-----------------|---------|---------|
| | | 有限元计算值 | 神经网络输出值 | |
| 1 | 50 | 4 535. 026 | 4 550 | 0. 330 |
| 2 | 100 | 9 068. 984 | 9 070 | 0. 011 |
| 3 | 150 | 13 602. 941 | 13 635 | 0. 236 |
| 4 | 200 | 18 136. 899 | 18 163 | 0. 144 |
| 5 | 250 | 22 670. 857 | 22 704 | 0. 146 |
| 6 | 300 | 27 204. 814 | 27 479 | 1. 008 |
| 7 | 350 | 31 738. 772 | 31 864 | 0. 395 |
| 8 | 400 | 36 272. 729 | 36 317 | 0. 122 |
| 9 | 450 | 40 806. 687 | 41 184 | 0. 925 |
| 10 | 500 | 45 340. 644 | 45 483 | 0. 314 |
| 11 | 550 | 49 874. 602 | 49 883 | 0. 017 |
| 12 | 600 | 54 408. 559 | 54 090 | −0. 585 |

表 7 失效概率 P_f^C 与目标可靠度指标比较

Tab. 7 Comparisons of failure probability P_f^C and target reliability

| 失效模式 | P_f^C | 可靠度指标 | 目标可靠度指标 | 目标失效概率 | 检验结果 |
|---------|-----------------------|-------|---------|----------------------|-----------|
| 墩底弯曲破坏 | 3.15×10^{-6} | 4. 52 | 3. 89 | 5.0×10^{-5} | 满足目标可靠度指标 |
| 撞击点剪切破坏 | 8.40×10^{-8} | 5. 23 | 3. 89 | 5.0×10^{-5} | 满足目标可靠度指标 |

表 8 不同重车荷载作用下桥墩荷载效应

Tab. 8 Load effects of piers under different heavy vehicles

| 重车荷载 L_L/kN | 车道荷载变量 | | L_L 单独作用下荷载效应 (横桥向) | |
|-------------------------|---------------------------------------|-----------------|-------------------------------------------|--------------------------|
| | $q_k/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$ | P_k/kN | 墩底弯矩效应/ ($\text{kN} \cdot \text{m}$) | 撞击点剪力 效应/ kN |
| 350 | 6.76 | 270.81 | 5 248.064 | 47.878 |
| 400 | 7.71 | 291.84 | 5 619.935 | 52.732 |
| 450 | 8.65 | 312.87 | 6 021.274 | 57.887 |
| 500 | 9.60 | 333.90 | 6 392.367 | 62.726 |
| 550 | 10.54 | 360.00 | 6 789.513 | 68.087 |
| 600 | 11.49 | 375.96 | 7 165.466 | 72.732 |
| 650 | 12.43 | 394.50 | 7 524.533 | 77.329 |
| 700 | 13.38 | 418.02 | 7 937.897 | 82.726 |
| 750 | 14.32 | 429.00 | 8 259.553 | 86.572 |
| 800 | 15.27 | 460.08 | 8 710.996 | 92.732 |
| 850 | 16.21 | 488.70 | 9 120.168 | 98.335 |

$N(4\ 123.46, 1\ 188.25^2)$, 已知桥墩弯矩抗力 $\ln R_M \sim N(12.796\ 5, 0.140\ 7^2)$ 。对 S_M^L, R_M 相交处进行积分可求得, 桥墩在汽车荷载下的弯矩破坏失效概率约为 1.71×10^{-12} 。同时汽车荷载对撞击点剪力效应极小, 在与船撞荷载组合时, 可以忽略剪力效应。

2.6 C_V 与 L_L 荷载组合下结构失效概率 P_f^{LC}

2.6.1 C_V 与 L_L 荷载组合

在船舶撞击桥梁发生时, 汽车荷载出现的概率非常高。根据汽车荷载实测统计数据^[23], 一周内统计了 97 479 veh, 其中重车荷载在 350~850 kN 范围内的车辆为 8 285 veh。由泊松分布假定, 重车的发生频率为 73 s/veh, 重车经过实桥的时间取 6 s, 可以判定船舶撞击发生时, 桥上通过重车的概率为 0.082。船舶撞击荷载与重车荷载 2 个随机变量相互独立, 重车通过撞击墩位置并发生偏载时才使 L_L 的荷载效应达到峰值。因此, 当 C_V 达到峰值时, L_L 很可能没有达到峰值。需要对 C_V, L_L 进行荷载组合, 组合方式采用塔克斯特拉(Turkstra)准则^[24]。

2.6.2 BP 神经网络训练

各规范中船撞荷载 C_V 的分项系数均为 1.0, 汽车荷载 L_L 的分项系数小于 1.0。考虑到 C_V 产生的效应都很大, L_L 的荷载效应相对较低, 所以本文对 C_V 荷载的分项系数 ϕ_{C_V} 取 1.0, L_L 荷载的分项系数 ϕ_{L_L} 分别取 0.5、0.6、0.7、0.8、0.9、1.0; 计算各分项系数下荷载组合的失效概率, 与目标可靠度进行比较, 给出该桥在荷载偶然组合下分项系数的合理值。

选取矩阵 $\mathbf{A}=[0\ 25\ 50\ 75\ 100\ 125\ 150\ 175\ 200$

225 250 275 300 325 350 375 400 425 450 475 500]^T 作为 D, V 的神经网络训练样本; 矩阵 $\mathbf{B}=[350\ 400\ 450\ 500\ 550\ 600\ 650\ 700\ 750\ 800\ 850]^T$ (单位: kN) 作为 L_L 的训练样本; 以矩阵 $\mathbf{W}=[100\ 200\ 300\ 400\ 500\ 50\ 150\ 250\ 350\ 450; 400\ 500\ 600\ 700\ 800\ 850\ 750\ 650\ 550\ 450]^T$ 作为检验样本。将矩阵 \mathbf{A} 中各元素分别与矩阵 \mathbf{B} 中各元素相搭配, 通过 CSI Bridge 有限元模型计算得到总的神经网络训练样本输入值, 当检验样本中神经网络仿真结果与有限元计算结果的相对误差足够小时, 才能进行 Monte Carlo 法抽样计算失效概率。

2.6.3 Monte Carlo 法计算失效概率

利用 MATLAB 程序产生随机变量船舶撞击荷载 C_V 与汽车荷载 L_L 的随机数、抗力 R 的随机数, 代入训练好的 BP 神经网络模型中, 计算出各随机变量相对应的荷载效应 S , 与抗力 R 对比求出失效次数, 对船撞作用下桥梁失效概率进行计算。仅以墩底弯曲破坏为失效模式, 墩底弯矩抗力服从 $\ln R_M \sim N(12.796\ 5, 0.140\ 7^2)$ 。 C_V 分项系数取 1.0, L_L 分项系数取 0.5~1.0 的变化值, C_V 与 L_L 荷载共同作用下结构失效概率分别为 5.59×10^{-6} 、 3.05×10^{-5} 、 9.50×10^{-5} 、 1.36×10^{-4} 、 4.90×10^{-4} 、 9.50×10^{-4} 。以上失效概率值为船舶撞击桥墩时重车过桥中发生结构失效的概率, 船撞与汽车组合作用下的桥梁失效概率 P_f^{LC} 还需以上失效概率值乘以重车刚好过桥的条件概率 0.082。在考虑年失效概率时, 将船撞年频率与单次荷载组合作用下结构的失效概率相乘, 则 L_L 分项系数取 0.5~1.0 时, 年失效概率 P_f^{LC} 分别为 9.63×10^{-7} 、 5.25×10^{-6} 、 1.64×10^{-5} 、 2.34×10^{-5} 、 8.44×10^{-5} 、 1.64×10^{-4} 。

2.7 总失效概率的计算

本文采用 F-A-M 法计算桥梁在偶然荷载与汽车荷载下的失效概率。先计算分项失效概率, 结构的失效概率为各分项失效概率之和, 总的失效概率为

$$P_f = P_f^L + P_f^C + P_f^{LC} \tag{7}$$

船撞与汽车组合采用 Turkstra 准则。然后对规范中推荐的分项系数带入极限状态方程中, 求出不同分项系数下的桥梁失效概率, 与目标可靠度指标进行比较, 给出连续刚构桥在偶然组合下分项系数的建议值。总失效概率 P_f 的计算结果如表 9 所示。

通过对该桥船撞荷载与汽车荷载的组合失效概率计算可知, 船撞荷载分项系数取 1.0、汽车荷载分

表 9 C_V 与 L_L 荷载组合的总失效概率

Tab. 9 Total failure probability of C_V and L_L load combinations

| 船撞荷载 分项系数 ψ_{C_V} | 汽车荷载分 项系数 ψ_{L_L} | 结构总失 效概率 P_f | 可靠 度指 标 β | 目标可 靠度 指标 | 目标失 效概率 | 检验 结果 |
|------------------------------|---------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------|----------------------|----------|
| 1.0 | 无汽车荷载 | 3.15×10^{-6} | 4.516 | 3.891 | 5.0×10^{-5} | 满足 |
| | 0.5 | 4.11×10^{-6} | 4.459 | | | 满足 |
| | 0.6 | 8.40×10^{-6} | 4.304 | | | 满足 |
| | 0.7 | 1.96×10^{-5} | 4.112 | | | 满足 |
| | 0.8 | 2.66×10^{-5} | 4.041 | | | 满足 |
| | 0.9 | 8.76×10^{-5} | 3.752 | | | 不满足 |
| | 1.0 | 1.67×10^{-4} | 3.587 | | | 不满足 |

项系数取 0.8 时,可靠度指标最接近目标可靠度指标。为使该桥偶然组合下的设计偏安全,建议该连续刚构桥船撞与汽车荷载组合时的分项系数取值为:船撞荷载组合分项系数 1.0、汽车荷载组合分项系数 0.8。其中,汽车荷载组合分项系数取值略大于《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)与 AASHTO LRFD 桥梁设计规范规定的偶然组合中的汽车荷载分项系数取值。

2.8 可靠度指标与分项系数的关系

为了进一步研究 ψ_{C_V} 、 ψ_{L_L} 的取值对可靠度指标 β 的影响,对 ψ_{C_V} 、 ψ_{L_L} 取不同的值,并计算出相应的总失效概率 P_f 和 β ,得到 β 与各分项系数的影响面,如图 11 所示。

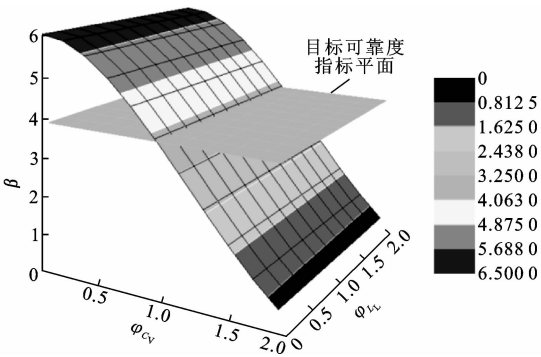


图 11 β 与 ψ_{C_V} 、 ψ_{L_L} 的影响面与目标可靠度指标的比较

Fig. 11 Comparisons between target reliability and influence surface of β and ψ_{C_V} 、 ψ_{L_L}

用 MATLAB 软件对 β 与 ψ_{C_V} 、 ψ_{L_L} 进行多项式拟合,以 95% 的置信区间,拟合公式为

$$\begin{aligned} \beta = & 8.063 - 3.563\psi_{C_V} - 1.213\psi_{L_L} + \\ & 0.028\,81\psi_{C_V}^2 + 0.856\,6\psi_{C_V}\psi_{L_L} - \\ & 0.148\,7\psi_{L_L}^2 + 0.037\,62\psi_{C_V}^3 - \\ & 0.101\,6\psi_{C_V}^2\psi_{L_L} - 0.105\,1\psi_{C_V}\psi_{L_L}^2 \end{aligned} \tag{8}$$

由图 11 可知,在平面 $\beta=3.891$ 上方区域内的荷载组合分项系数下,桥梁结构的可靠度指标大于

目标可靠度指标。

3 结 语

(1)采用 F-A-M 法可方便、快速地求解桥梁结构船舶撞击偶然组合下的可靠度指标,可有效的对桥梁结构进行船撞风险分析。

(2)对船撞荷载分项系数 ψ_{C_V} 取 1.0,汽车荷载分项系数 ψ_{L_L} 分别取 0.5、0.6、0.7、0.8、0.9、1.0 时,计算出分项系数在不同取值情况下,桥梁在偶然作用下的失效概率,并与目标可靠度进行比较,得出主跨不超过 150 m 的连续刚构桥船舶撞击作用与汽车荷载组合时的分项系数建议值为:船舶撞击作用荷载组合分项系数取 1.0、汽车荷载组合分项系数取 0.8。

(3)给出了可靠度指标 β 与船撞荷载分项系数 ψ_{C_V} 、汽车荷载分项系数 ψ_{L_L} 的影响面关系图,并确定了 β 与 ψ_{C_V} 、 ψ_{L_L} 之间的回归关系。

(4)在确定结构抗力分布时,并未考虑抗力随时间衰减的情况,需进一步研究确定构件抗力衰减函数。随着日益增加的水上、陆上交通量,船舶撞击力以及车辆荷载逐年增加,在设计年限内为对桥梁结构进行船撞的风险分析,还需考虑交通量增长的情况。中国内河航道种类繁多,需进一步研究中国典型河段的船舶事故率,为桥梁船舶撞击概率计算提供必要的参数支持。

参考文献:

References:

[1] GHOSN M, MOSES F, WANG J. Design of highway bridges for extreme events [R]. Washington DC: Transportation Research Board, 2003.

[2] HIDA S E. Statistical significance of less common load combinations[J]. Journal of Bridge Engineering, 2007, 12(3): 389-392.

[3] LEE G C, LIANG Z, SHEN J, et al. A framework for development of multi-hazard load and resistance factor design [R]. Buffalo: University at Buffalo, State University of New York, 2011.

[4] LEE G C, RZHEVSKY V, TONG M, et al. From the WTC tragedy to the development of disaster engineering for landmark buildings—An extension of the performance-based earthquake engineering approach [R]. Buffalo: University at Buffalo, State University of New York, 2003.

[5] LEE G C, TONG M, YEN W P. Design of highway

- bridges against extreme hazard events; issues, principles and approaches[R]. Buffalo: University at Buffalo, State University of New York, 2008.
- [6] POTRA F A, SIMIU E. Multihazard design; Structural optimization approach[J]. Journal of Optimization Theory and Applications, 2010, 144: 120-136.
- [7] LEE G C, HUANG C, MOHAN B S. A study of U. S. bridges failures[R]. Buffalo: University at Buffalo, State University of New York, 2013.
- [8] AASHTO LRFD, AASHTO LRFD bridge design specifications[S].
- [9] JTG D60—2015, 公路桥涵设计通用规范[S].
JTG D60—2015, General specifications for design of highway bridges and culverts[S].
- [10] 周 敕, 封 伟, 谢功元, 等. 基于 F-R-M 方法的桥梁地震风险评估研究[J]. 广西大学学报: 自然科学版, 2017, 42(1): 299-308.
ZHOU Mi, FENG Wei, XIE Gong-yuan, et al. Based on the F-R-M method of bridge seismic risk assessment study[J]. Journal of Guangxi University: Natural Science Edition, 2017, 42(1): 299-308.
- [11] 田雨波, 陈 风, 张贞凯. 混合神经网络技术[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
TIAN Yu-bo, CHEN Feng, ZHANG Zhen-kai. Hybrid neural network technology[M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [12] 章 毅, 郭 泉, 王建勇. 大数据分析的神经网络方法[J]. 工程科学与技术, 2017, 49(1): 9-18.
ZHANG Yi, GUO Quan, WANG Jian-yong. Neural network method for big data analysis[J]. Journal of Engineering Science and Technology, 2017, 49(1): 9-18.
- [13] 陈 健, 盘钦卿, 王卫星. MATLAB 实现蒙特卡洛法在箱梁施工可靠度中的应用[J]. 重庆工商大学学报: 自然科学版, 2011, 28(1): 90-93.
CHEN Jian, PAN Qin-qing, WANG Wei-xing. Application of Monte Carlo method realized by MATLAB to the reliability of box-girder construction[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University: Natural Science Edition, 2011, 28(1): 90-93.
- [14] 丁殿坤. 数学建模基础[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2015.
DING Dian-kun. Foundations of mathematical modeling[M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2015.
- [15] 耿 波. 桥梁船撞安全评估[D]. 上海: 同济大学, 2007.
GENG Bo. Safety evaluation of bridge ship collision [D]. Shanghai: Tongji University, 2007.
- [16] AASHTO LRFD—1994, AASHTO LRFD bridge design specification[S].
- [17] GB/T 50283—1999, 公路工程结构可靠度设计统一标准[S].
GB/T 50283—1999, Unified standard for structural reliability design of highway engineering[S].
- [18] 耿 波, 汪 宏, 王君杰. 三峡库区桥梁船撞主要影响参数的概率模型[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2008, 36(4): 477-482.
GENG Bo, WANG Hong, WANG Jun-jie. Probabilistic model of main impact parameters of bridge ship in Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2008, 36(4): 477-482.
- [19] 李佩云, 郝 伟. 航道桥梁船撞风险概率模型的研究[J]. 城市道桥与防洪, 2015, 3(3): 155-158.
LI Pei-yun, HAO Wei. A study on probability model of ship collision risk in waterway bridges[J]. Urban Roads, Bridges and Flood Control, 2015, 3(3): 155-158.
- [20] 西安中交土木科技有限公司. 潮汕环线高速公路船撞设防标准及结构船撞安全性评价研究报告[R]. 西安: 西安中交土木科技有限公司, 2016.
Xi'an Zhongjiao Civil Engineering Technology Co., Ltd., Research report on ship collision defense standard and structural ship collision safety evaluation of Chaoshan Ring Expressway[R]. Xi'an: Xi'an Zhongjiao Civil Engineering Technology Co., Ltd., 2016.
- [21] 胡先春, 李德建, 宁夏元, 等. 刚构-连续梁桥船撞桥墩最不利位置及安全性评价[J]. 铁道科学与工程学报, 2013, 10(2): 30-35.
HU Xian-chun, LI De-jian, NING Xia-yuan, et al. Evaluation of the most unfavorable position and safety of bridge piers of rigid-concrete-continuous girder bridges[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2013, 10(2): 30-35.
- [22] 高荣雄, 李 敬, 唐奇文. 船撞冲击下高桩桥墩高危损伤区域分布[J]. 土木工程与管理学报, 2016, 33(1): 24-31.
GAO Rong-xiong, LI Jing, TANG Qi-wen. Distribution of high-risk damage areas of high-pile piers under ship impact[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2016, 33(1): 24-31.
- [23] 党 栋. 公路桥梁设计荷载及其组合研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.
DANG Dong. Research on design loads and combinations of highway bridges[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.
- [24] TURKSTRA C J, MADSEN H O. Load combinations in codified structural design[J]. Journal of Structural Engineering, 1980, 106(12): 2527-2543.