

# 桥梁结构服役状态可靠度评估综述

彭建新,柴莹,张建仁

(长沙理工大学 土木工程学院,湖南 长沙 410114)

**摘要:**该文简单评述了结构设计理论的原理和发展,总结了结构可靠度理论的研究现状;详细叙述并分析了可靠度理论的各种适用方法,概述了结构可靠度分析和基于可靠度的设计优化的最新进展,分析了不确定性的传播方法和可靠度评估方法,总结了结构可靠度发展的趋势,可为未来学者研究结构可靠度提供总结和参考。

**关键词:**结构设计;结构可靠度;不确定性;可靠度评估

**中图分类号:**U441

**文献标志码:**A

## 0 引言

桥梁作为重要的基础设施建设,是交通生命线的咽喉。由于各种不利环境和荷载的作用,会在桥梁结构的内部产生损伤,损伤未及时处理将导致结构坍塌,造成巨大的经济损失和人员伤亡。桥梁结构服役状态的评估是指导桥梁维修、养护等工作的重要基础。结构的可靠性是指结构的安全性、适用性和耐久性。为确保桥梁结构的运营安全,有必要对桥梁结构的运营状态进行可靠性评估。

基于可靠度理论的评估方法拥有严谨的理论依据,是目前桥梁评估方法的主流趋势。结构可靠度是指在规定的条件和时间内,工程结构完成预定功能的概率,是工程结构可靠度的概率度量<sup>[1]</sup>。结构能够完成预定功能的概率,称为可靠概率;结构不能完成预定功能的概率,称为失效概率<sup>[2-3]</sup>。工程结构设计的目的力求经济效益最大化的同时,保证工程结构使用期限内安全可靠<sup>[4-7]</sup>。在进行结构可靠度分析时,针对结构要求的各种功能,把相关因素作为基本变量,由基本变量组成描述结构功能的函数,用此结构功能函数可以反映结构的工作状态。

本文首先介绍结构可靠度理论的起源与发展,

概述可靠性评估方法和技术的探索以及参数不确定性的来源与分类,总结考虑各种不确定性的可靠性分析方法研究现状。将结构可靠度分析方法分为时变可靠度、时空可靠度、多尺度可靠度和模糊可靠度4个方面,对其研究现状进行详细阐述,并对结构可靠度的发展趋势进行总结,为未来学者研究结构可靠度提供参考。

## 1 结构可靠度理论研究现状

结构可靠度理论起源于20世纪40年代,经历几十年的发展,国内外学者对其开展了广泛的理论研究<sup>[8]</sup>。工程结构可靠度设计中,以失效概率和可靠指标作为可靠度的表示手段,都是在可靠度功能函数服从正态分布的情况下进行定义的,此时二者有一一对应关系<sup>[9]</sup>。在实际工程结构中随机变量分布模型多样且功能函数表达形式多变,此时无法直接计算结构的可靠指标,需要采用近似计算方法获得结构的可靠指标。中国统一标准规定的目标可靠指标对应于设计使用年限内的允许累积失效概率<sup>[10]</sup>。对于不同的设计使用年限,结构的累积失效概率和可靠指标是不同的,此时结构的允许累积失效概率和目标可靠指标要进行调整。

收稿日期:2023-01-13

基金项目:国家重点基础研究发展计划项目(编号:2015CB057705);国家重点研发计划项目(编号:2021YFB2600900);国家自然科学基金资助项目(编号:52078056)

作者简介:彭建新,男,博士,教授.E-mail:jianxinpeng@csust.edu.cn

近年来,关于结构可靠度评估的研究逐渐受到国内外学者们的重视。研究旨在探索不同方法和技术来评估结构的可靠性,以确保其在设计使用年限内安全可靠。常规的结构可靠性评估方法包括基于统计学和概率论的方法<sup>[11-12]</sup>。其中蒙特卡罗模拟方法是最常见的一种,该方法采用随机数模拟可能存在的所有情况,形成结构响应分布曲线。此外,还有可靠性指标法、极限状态方法等。可靠性指标法将结构可靠度问题转化为一个优化问题,建立功能函数和约束条件,求解得到最小的安全系数。极限状态方法是根据结构参量的统计信息确定结构的极限状态,进而对其进行可靠性评估<sup>[13]</sup>。

随着深度学习和人工智能技术的发展,越来越多的研究开始尝试将这些新兴技术与传统方法相结合,以实现更加精准高效的结构可靠度评估。例如,基于深度学习的方法通过大数据处理和人工神经网络训练来学习结构响应的非线性特征,提高结构可靠度的评估精度。此外,还有基于信息理论的方法、模型预测控制法以及专家系统技术等。

以不确定性的来源分类,计算可靠度的参数的不确定性主要涵盖偶然不确定性和认知不确定性<sup>[14]</sup>。在参数收集进程中无法避免的误差称为偶然不确定性,增加试验次数也不能减少这些变异的出现;认知不确定性主要是由认知的不全面造成的,随着知识水平的提高,认知不确定性会随之降低<sup>[15-17]</sup>。在传统的概率分析中,只考虑偶然不确定性,或者将所有来源的不确定性处理为整体不确定性。随着结构工程中不确定性分析的发展,一些学者开始研究认知不确定性的区分及其对结构不确定性分析的影响。

Beer等<sup>[15]</sup>回顾了工程中不确定性的分类,讨论了证据理论和模糊概率的主要特征和相互关系;Ma等<sup>[18]</sup>介绍了一个系统的框架来量化概率模型的混合不确定性,并提出了一种基于边缘积分的不确定性混合描述方法;Tonon<sup>[19]</sup>研究了具有不确定参数的机械系统的响应,旨在评估现代不确定性数学理论在可靠性工程和风险分析中的适用性;Guo等<sup>[20]</sup>通过改进证据理论,用于比较不同权重系数下的识别结果;Mourelatos等<sup>[21]</sup>提出了一种可以同时考虑偶然和认知不确定性的方法;Zeng等<sup>[22]</sup>考虑了认知不确定性

的影响,开发了一种新的结构可靠度评估方法,称为信念可靠度。为了评估信念可靠度,提出了一个将设计余量、偶然不确定性和认知不确定性整合起来的综合框架,以产生一个全面和系统的可靠度描述;朱爱红等<sup>[23]</sup>通过应用贝叶斯网络,优化对不确定性的传播的分析;Du等<sup>[24-25]</sup>使用非线性优化方法进行区间分析来考虑不确定性;Tao等<sup>[26]</sup>采用重要抽样方法计算失效概率及参数的方差和变异系数。在实际工程问题中,参数变量可能既有偶然和认知不确定性,又具有空间变异性<sup>[27-29]</sup>。

总之,随着科技的不断进步,各种方法之间相互融合取长补短,出现各种结构可靠度评估方法以实现更加准确可靠的评估结果。

## 2 结构可靠度分析方法研究现状

### 2.1 时变可靠度

中国现行结构设计规范中的可靠度分析模型尚未充分考虑时间变化的因素,是一个静态模型。1975年,Kameda等<sup>[30]</sup>首次提出了既有钢筋混凝土结构时变可靠度的概念,为既有结构的时变可靠度评估提供了理论基础。引起结构在服役期间可靠度动态变化的因素主要来自两个方面:一是因材料耐久性引起的结构抗力退化;二是因后续使用年限变化引起的荷载效应变化<sup>[31-32]</sup>。

在时变抗力模型方面,1990年,Nowak<sup>[33]</sup>针对抗力退化对混凝土桥梁可靠度的影响进行了研究,提出了考虑钢筋腐蚀的结构可靠度计算方法;贡金鑫等<sup>[34]</sup>分析了抗力的影响因素和结构性能退化的原因,提出了考虑抗力随时间变化的结构可靠度分析方法;张建仁等<sup>[35]</sup>对混凝土斜拉桥主梁建立了施工期抗力的时变概率模型,并对抗力影响因素进行了敏感性分析;张社荣等<sup>[36]</sup>采用具有平稳独立增量特性的Gamma随机过程描述结构抗力的单调下降退化过程。

在时变荷载模型方面,Moses<sup>[37]</sup>在1979年首次提出了桥梁动态称重的概念,对桥梁结构的车辆荷载研究起到了很大的促进作用;1987年,Moses等<sup>[38]</sup>研究了荷载历史的作用,分析了验证荷载和曾经使用荷载对既有桥梁可靠度的影响;2008年,王磊

等<sup>[39-40]</sup>依据中国现有的车辆荷载统计资料,采用卷积方法研究了不同车辆荷载连续过桥的概率密度函数,确定了不同跨径桥梁最大车辆荷载数目。基于平衡更新过程理论推导了车队长度的概率函数,建立了既有公路桥梁结构的车辆荷载效应模型;金聪鹤等<sup>[41]</sup>采用Gamma随机过程描述车辆荷载频率函数,提出了基于荷载频率增大的钢筋混凝土桥梁时变可靠度分析方法。考虑历史荷载信息对桥梁时变抗力的验证作用,改进了抗力变异系数为时间变量的桥梁时变可靠度计算公式。

在将抗力和荷载效应视为随机过程的基础上,国内外科研工作者对时变可靠度进行了研究。Dey等<sup>[42]</sup>考虑抗力和荷载效应的时变性以及周期性维护等因素,提出了一种用于计算脆性结构体系时变可靠度的重要抽样方法;王光远<sup>[43]</sup>根据结构抗力和荷载效应随时间变化的特点,提出了结构动态可靠度的概念,并给出结构维修策略;赵国藩等<sup>[44]</sup>分析了考虑抗力和荷载的时变性的钢筋混凝土结构生命全过程的可靠度。

## 2.2 时空可靠度

现有的可靠性分析方法大多忽略了参数的空间变异性对结构造成的不确定性影响,可能引起较大的误差<sup>[45-46]</sup>。为确保工程结构能够安全可靠地完成其预定功能,研究高效高精度的时空变异可靠性评估方法具有重要科学研究意义及应用价值。

南航<sup>[47]</sup>基于结构的响应极值,提出一种时空变异可靠性分析的核密度估计方法。基于晶格点法的偏分层抽样方法产生随机样本,在子时间区间内进行极值分析以获取相应极值样本;彭建新等<sup>[48]</sup>基于随机场理论,考虑参数的时空变异性,建立空间时变可靠度模型来预测RC结构在不同环境条件下碳化腐蚀开始比例和顺筋锈胀开始比例;阳逸鸣等<sup>[49]</sup>基于材料性能和结构尺寸的空间变异性,建立了RC梁抗力时空退化模型;He等<sup>[50]</sup>研究了钢筋混凝土试件的破坏模式及其在极限荷载作用下的损伤演化,并讨论了钢筋锈蚀的空间变异性及持续荷载水平的影响,提出了一个模拟纵向钢筋部分长度内钢筋腐蚀空间变异性的概率模型;Yuan等<sup>[51]</sup>针对单线试件,研究了均匀腐蚀过程、表面微观形貌变化和时变点蚀

模型。考虑护套的不同损伤条件,研究了电缆横截面内电线的空间腐蚀变异性;Pugliese等<sup>[52]</sup>在交通需求增加和空间可变的点蚀作用下对既有钢筋混凝土桥梁进行了可靠性评估。利用经验数据建立了裂纹萌生、点蚀因子、严重裂纹和覆盖层剥落的概率模型。

## 2.3 多尺度可靠度

传统的系统可靠度评估受限于资源和经济,不能合理地代表系统的真实工作状态<sup>[53-54]</sup>。Zhou等<sup>[55]</sup>提出了一种基于生命周期的绿色系统多尺度可靠度评估方法。该方法讨论并证明了传统的系统可靠度评估方法的局限性。该方法基于单位可靠度和概率理论,并不依赖于单元数量和可靠度测试,因此在系统可靠度的设计和评估中节省资源和经济。由于考虑了系统的工作状态和单位生命周期的特点,它在评估系统可靠度时也更加合理。

周小焱等<sup>[56]</sup>采用有限元分析和参数敏感性分析识别对宏观响应影响显著的不确定性参数,根据显著参数概率信息的完整性,将其划分为区间变量和随机变量。运用多尺度方法和随机-区间混合可靠性分析方法,建立了概率和非概率不确定性并存的FRP结构多尺度混合可靠度分析模型;姚晓征等<sup>[57]</sup>提出了扁平钢箱梁结构的多尺度可靠度分析方法。采用子结构方法将扁平钢箱梁整体结构尺度模型和局部构件尺度模型相互衔接,以此为基础采用改进响应面法分析了扁平钢箱梁结构的静力可靠度;丁幼亮等<sup>[58]</sup>以润扬大桥为分析对象,提出了扁平钢箱梁结构的多尺度损伤分析方法。采用子结构方法将钢箱梁结构全尺度动力响应和细节尺度构件损伤相互衔接实现多尺度损伤分析。

Zhou等<sup>[59]</sup>考虑微观和宏观尺度的混合概率和区间不确定性,将多尺度计算均质化方法与随机和区间不确定性分析方法结合,建立了混合多尺度可靠性分析方法来量化玻璃钢桁架桥梁的可靠性;Zhou等<sup>[60]</sup>考虑微观和宏观不确定性(材料特性和铺层角度)提出了一种新颖的多尺度复合材料结构可靠性分析方法。通过随机多尺度有限元方法得到随机结构响应,建立了结构响应与微观随机变量之间的关系;Akula<sup>[61]</sup>研究了多尺度设计参数的变化对复合材



料加筋板在轴向压缩下结构响应的影响。采用加筋板的有限元模型估计了初始基线力-位移响应,修改宏观和微观变量并估计了力-位移响应的变化。Fish等<sup>[62]</sup>针对非均质材料,建立了多尺度疲劳寿命预测模型。基于降阶均匀化的时间多尺度方法与空间多尺度方法相结合对高温陶瓷基复合材料进行了表征。

#### 2.4 模糊可靠度

在实际结构可靠性分析中,不仅存在随机不确定性,还存在模糊不确定性。一般认为桥梁结构所处状态安全与否的界限是明确的、没有中间过渡的。实际上结构安全与否的界限是模糊的且有一个过渡区间,即结构安全客观上不存在唯一确定的临界点<sup>[63]</sup>。

郭焯斌等<sup>[63]</sup>分析了影响主梁弯矩效应与抗弯承载力的各种模糊因素,利用模糊可靠性理论的3种方法求解了主梁的模糊可靠度,并讨论了模糊自变量取不同分布参数时模糊可靠度的变化趋势;李云贵等<sup>[64]</sup>应用模糊随机概率理论,提出了考虑随机性和模糊性影响的结构可靠度分析模型——模糊随机模型,给出了各种条件下结构可靠度分析表达式;吕颖钊等<sup>[65]</sup>结合模糊评价理论、层次分析法以及概率可靠度的方法建立了钢筋混凝土梁桥缺损状况模糊可靠性评价模型;周建方等<sup>[66]</sup>对目前计算抗力为模糊变量、应力为随机变量的情况进行了系统的分析总结,推导了抗力的隶属函数为线性、正态分布情况的有关公式。

Nie等<sup>[67]</sup>基于直接积分法和椭球凸模型,提出了一种新的模糊可靠性方法。利用模糊数学原理的分解,将模糊可靠性模型转化为非概率可靠性模型,并将模糊变量转化为区间变量。构造了多维椭球凸模型来量化不确定性,同时将Sigmoid函数引入直接积分法来逼近阶跃函数,并用直接积分法求解模糊可靠性;Fang等<sup>[68]</sup>在随机载荷作用下提出了一种新的结构动态模糊可靠性分析方法。利用应力-强度干涉理论,建立了强度退化和强度不退化时响应的模糊可靠性预测模型;Moufti等<sup>[69]</sup>提出了一种模糊层次证据推理方法,用于不确定条件下混凝土桥梁的详细状态评估。

### 3 发展趋势

结构可靠度评估方法的重要意义在于综合考虑了工程结构中的各种不确定因素,对结构的可靠性有一个客观的统一度量,力求达到最佳的经济效益,将失效概率控制在人们能接受的程度。不确定性是结构设计、施工和使用中客观存在的现象,对这种客观现象的认识由来已久。最初对这种不确定性通过安全系数加以考虑,安全系数的取值根据工程事故率来确定,难免造成较大的材料浪费和潜在的经济损失。用可靠度这种理性方法代替安全系数这种经验法,是科学技术发展的必然结果,也是事物发展的客观规律。结构可靠度作为处理和分析结构随机性的理论和方法不断发展,也在不断改进其中的不完善之处。可靠度评估方法作为评估结构和模型的功能和性能的重要准则。随着国内外学者的研究和不断创新,众多可靠度评估方法应运而生,主要有基于时间变异性、时空变异性、多尺度和模糊不确定性等方面。

在时间变异性方面,实际工程中结构因腐蚀、老化等因素随时间延长其力学性能会衰减,承受的荷载也随时间变化。传统的静态可靠性分析忽略了时间因素,这将错估结构的可靠性,造成一定的安全隐患。目前对时变可靠性评估方法的研究发展显著,提出了各具特点的方法,但是各方法在精度、效率、适用性和鲁棒性等方面存在诸多挑战。未来的发展趋势在于对时变可靠性分析方法进行探索和和改进,力求提高时变可靠性分析方法的精度、效率并解决其他方面的问题。

在时空变异性方面,时空变异性指结构参数分布具有空间变异性和时间变异性。空间变异性指结构的材料属性或几何参数在空间上的变化,时间变异性指结构性能和承受的荷载随时间变化。在结构可靠性评估中不考虑参数时空变异性,其可靠度水平将被错估。目前关于时空变异性可靠性评估的研究相对较少,研究基础薄弱。如何将时间变量和空间变量解耦,实现考虑时空变异性的可靠性评估方法的简化处理是目前的难点。现有的可靠性分析在解决时空变异性方面效率低下。未来的发展趋势在

于开发出高效的时间变异性 and 空间变异性解耦方法,在提高精度的同时保证计算效率,使得对桥梁结构可靠度评估精准高效。

在多尺度方面,结构的损伤受随机类和区间类不确定性参数的共同影响,考虑随机类和区间类混合不确定性影响的桥梁结构可靠度评估更加精准。目前对于混合不确定性的研究主要集中在宏观方面,微观组织形貌和分布规律对宏观力学性能影响的研究很少,已有部分学者关注到这个问题。未来的发展趋势在于研究微观变量和宏观响应的跨尺度衔接规律,进而准确高效的对桥梁结构进行可靠度评估。

在模糊性方面,传统可靠度理论认为结构所处的状态分为正常和失效两种。这样的划分忽略了结构从正常状态演变为失效状态这一过程的模糊不清的状态。模糊可靠度舍弃了传统可靠度离散有界的假设,采用隶属函数的形式更加符合工程实际。目前模糊可靠度仅仅将模糊概率应用到结构使用状态上,而由结构破坏边界不清晰引起的模糊也是需要确定的重要不确定性因素。未来的发展趋势在于研究清楚结构破坏边界的模糊含义,不断对结构危害的模糊性进行研究,进而对桥梁结构可靠度评估方法的发展起到推动作用。

上述这些方法各有优势,也有自身无法克服的缺陷。未来的发展趋势是各种评估方法相互借鉴、取长补短,同时引入深度学习和人工智能技术,使得桥梁结构服役状态的可靠度评估方法势必向着精准高效的方向发展。

## 4 结语

结构可靠度理论是用来帮助人们解决工程结构中认识已久的不确定性问题的一种决策方法。对不确定性问题的认识不是一朝一夕的事,需要进行长期的研究和积累经验。因此,结构的可靠度评估方法的准确性取决于理论与工程经验的结合,掌握的知识越多,主观经验越少,可靠性评估方法越合理,这也是学者们研究可靠度评估方法过程中不断追求的目标。

本文概述了结构可靠度理论的起源与发展、可靠性评估方法和技术的探索以及不确定性的来源与

分类,阐述了考虑各种不确定性的可靠性分析方法研究现状,这些方法包括时变可靠度、时空可靠度、多尺度可靠度和模糊可靠度等方面。总结了结构可靠度的发展趋势,可为未来学者研究结构可靠度提供参考。

## 参考文献:

- [1] 赵齐.工程结构可靠度理论综述[J].四川建筑,2019,39(3):199-200.
- [2] 马君明,张浩然,赵晓青,等.结构可靠度更新的子集模拟自适应延迟拒绝MMH算法[J].土木工程学报,2023,56(6):14-24.
- [3] 吉蔚,李国强,楼国彪.火灾下门式刚架倒塌预警可靠度研究[J].建筑结构学报,2023,44(2):154-164.
- [4] JIANG Z Y, HU W F, DONG W B, et al. Structural reliability analysis of wind turbines: A review[J]. Energies, 2017, 10(12): 2099.
- [5] 谈凤婕,崔家春.既有钢筋混凝土框架结构抗倒塌可靠度分析[J].建筑结构,2022,52(S2):361-368.
- [6] 丁雅杰,王佐才,辛宇,等.基于贝叶斯理论的非线性结构模型修正及其动力可靠度分析[J].工程力学,2022,39(12):13-22,59.
- [7] 李玲,蔡建明,欧阳桂华,等.基于可靠度的桥梁结构优化设计研究[J].科学技术创新,2022(25):70-73.
- [8] 盘荣杰,刘长江,刘坚,等.风驱雨荷载作用下鞍形膜结构动力响应及可靠度研究[J].振动与冲击,2023,42(11):295-303,323.
- [9] 吴乐乐,唐曹明,罗开海,等.关于既有建筑评估和改造的目标可靠指标确定方法的探讨[J].土木工程学报,2022,55(S1):196-202.
- [10] 周勇军,王业路,赵煜,等.公路独柱墩桥梁抗倾覆研究综述[J].交通运输工程学报,2022,22(6):46-66.
- [11] 吴凡,谭志勇,陈强,等.基于局部自适应代理模型的复合材料结构可靠性评估[J].东南大学学报(自然科学版),2023,53(1):30-36.
- [12] 张翼,李燕,孙博,等.考虑应力松弛和辐照影响的堆内构件压紧弹簧疲劳可靠性评估方法[J].核动力工程,2021,42(6):141-147.
- [13] 王智明,郑雷,张露熹,等.基于混沌多项式展开的机械结构可靠性分析[J].机械强度,2022,44(4):852-858.
- [14] 彭建新,廖鹏飞,王斌,等.气候变化影响下钢筋混凝土碳化损伤不确定性分析[J/OL].铁道科学与工程学报:1-11[2023-06-22].DOI:10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20221761.
- [15] BEER M, FERSON S, KREINOVICH V. Imprecise probabilities in engineering analyses[J]. Mechanical Systems

- and Signal Processing,2013,37(1/2):4-29.
- [16] WINDSCHITL P D, MILLER J E, PARK I, et al. The desirability bias in predictions under aleatory and epistemic uncertainty[J].Cognition,2022,229:105254.
- [17] HICKEY J, LANGLEY R. Alternative metrics for design decisions based on separating aleatory and epistemic probabilistic uncertainties[J]. Mechanical Systems and Signal Processing,2022,181:109532.
- [18] MA Y F, WANG L, ZHANG J R, et al. Hybrid uncertainty quantification for probabilistic corrosion damage prediction for aging RC bridges[J]. Journal of Materials in Civil Engineering,2015,27(4):04014152.
- [19] TONON F.Using random set theory to propagate epistemic uncertainty through a mechanical system[J]. Reliability Engineering and System Safety,2004,85(1/2/3):169-181.
- [20] GUO H Y, ZHANG L. A weighted balance evidence theory for structural multiple damage localization[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering,2006,195(44/45/46/47):6225-6238.
- [21] MOURELATOS Z P, ZHOU J. A design optimization method using evidence theory[J]. Journal of Mechanical Design,2006,128(4):901-908.
- [22] ZENG Z G, KANG R, WEN M L, et al. A model-based reliability metric considering aleatory and epistemic uncertainty[J].IEEE Access,2017,5:15505-15515.
- [23] 朱爱红,董国庆.考虑认知不确定性的列控中心可靠性评估[J/OL].安全与环境学报:1-10[2023-06-01].
- [24] DU X P.Uncertainty analysis with probability and evidence theories[C]//ASME 2006 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference,2006:1025-1038.
- [25] DU X P. Unified uncertainty analysis by the first order reliability method[J].Journal of Mechanical Design,2008,130(9):090401.
- [26] TAO Y R, HAN X, DUAN S Y, et al. Reliability analysis for multidisciplinary systems with the mixture of epistemic and aleatory uncertainties[J].International Journal for Numerical Methods in Engineering,2014,97(1):68-78.
- [27] LI G J, LU Z Z, LU Z Y, et al. Regional sensitivity analysis of aleatory and epistemic uncertainties on failure probability [J].Mechanical Systems and Signal Processing,2014,46(2/3): 209-226.
- [28] 丁兆东,刘剑锋.基于疲劳损伤模型的钢筋混凝土梁疲劳可靠度分析[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2022,45(7):931-938,966.
- [29] 夏侯唐凡,陈江涛,邵志栋,等.随机和认知不确定性框架下的 CFD 模型确认度量综述[J].航空学报,2022,43(8): 180-196.
- [30] KAMEDA H, KOIKE T. Reliability analysis of deteriorating structures[J].Reliability Approach in Structural Engineering, 1975:61-76.
- [31] 蒋利学,王卓琳.基于评估使用年限的既有结构可靠度评定实用方法[J].结构工程师,2020,36(2):10-19.
- [32] 李晓阳,陶昭,张慰.基于不确定微分方程的疲劳可靠性建模[J].航空学报,2022,43(8):481-497.
- [33] NOWAK A S. Bridge evaluation, repair, and rehabilitation: Proceedings of the NATO advanced research workshop on bridge evaluation, repair, and rehabilitation, Baltimore, Maryland, USA, April 30-May 2, 1990[M]. Dordrecht: Kluwer Academic, 1990.
- [34] 贡金鑫,赵国藩.考虑抗力随时间变化的结构可靠度分析 [J]. 建筑结构学报,1998,19(5):43-51.
- [35] 张建仁,王文华.混凝土斜拉桥主梁施工期时变抗力分析 [J]. 中外公路,2004,24(5):39-42.
- [36] 张社荣,王超,孙博.退化结构时变可靠性分析的随机过程新模型[J].四川大学学报(工程科学版),2013,45(2): 28-32.
- [37] MOSES F. Weigh-in-motion system using instrumented bridges[J]. Transportation Engineering Journal of ASCE, 1979,105(3):233-249.
- [38] MOSES F, VERMA D. Load capacity evaluation of existing bridges[Z],1987.
- [39] 王磊,张建仁.既有公路桥梁不同车辆荷载连续到达过程模拟[J].中外公路,2008,28(2):83-88.
- [40] 王磊,张建仁.基于平衡更新过程的既有桥梁车辆荷载效应预测[J].中国公路学报,2008,21(5):50-56.
- [41] 金聪鹤,钱永久,张方,等.考虑非平稳过程的劣化钢筋混凝土梁桥时变可靠度分析[J].工程科学学报,2022,44(7): 1265-1273.
- [42] DEY A, MAHADEVAN S. Reliability estimation with time-variant loads and resistances[J]. Journal of Structural Engineering,2000,126(5):612-620.
- [43] 王光远.结构服役期间的动态可靠度及其维修理论初探 [J].哈尔滨建筑工程学院学报,1990,23(2):1-9.
- [44] 赵国藩,金伟良,贡金鑫.结构可靠度理论[M].北京:中国建筑工业出版社,2000.
- [45] 申焱华,石博强.基于 Copula 函数的广义随机空间内相关变量的可靠性分析[J].机械强度,2011,33(5):679-684.
- [46] 向东,高向玲.多重失效机制下钢筋混凝土剪力墙可靠性分析 [J/OL]. 建筑结构学报 : 1-14[2023-06-01]. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2022.0719.

- [47] 南航.考虑时空变异性的可靠性评估研究[D].南京:南京航空航天大学,2020.
- [48] 彭建新,张建仁.考虑腐蚀参数时空变异性的RC结构钢筋锈蚀随机分析[J].土木工程学报,2013,46(9):46-54.
- [49] 阳逸鸣,彭建新,张建仁.考虑多因素作用下的RC梁抗力时空退化模型[J].哈尔滨工业大学学报,2017,49(9):58-64.
- [50] HE Z S, HE C, MA G Y, et al. Performance assessment of partially corrosion-damaged RC segment incorporating the spatial variability of steel corrosion[J]. Construction and Building Materials,2023,371:130789.
- [51] YUAN Y G, LIU X D, PU G N, et al. Temporal and spatial variability of corrosion of high-strength steel wires within a bridge stay cable[J]. Construction and Building Materials, 2021,308:125108.
- [52] PUGLIESE F, RISI R D, Sarno L D. Reliability assessment of existing RC bridges with spatially-variable pitting corrosion subjected to increasing traffic demand[J]. Reliability Engineering and System Safety,2022,218:108137.
- [53] 王明洋,张蔚,徐冬冬,等.考虑自诊断的反应堆保护系统停堆功能可靠度评估模型研究[J].核动力工程,2023,44(2):159-165.
- [54] 江磊,王小敏,刘一骊,等.基于动态贝叶斯网络的CTCS3-300T列控车载系统运行可靠性及可用性评估[J].铁道学报,2020,42(3):85-92.
- [55] ZHOU J G, LI L L, TSENG M L, et al. Green system reliability assessment method based on life cycle: Resources and economical view[J]. Journal of Cleaner Production,2020,251: 119786.
- [56] 周小焱,王能威,汪昕,等.随机-区间混合不确定性下FRP桁架桥多尺度可靠性分析[J].中国公路学报,2022,35(2): 63-75.
- [57] 姚晓征,李爱群,孙鹏.大跨度斜拉桥扁平钢箱梁的多尺度可靠度分析研究[J].特种结构,2011,28(2):69-74.
- [58] 丁幼亮,李爱群,缪长青.大跨斜拉桥扁平钢箱梁的多尺度损伤分析研究[J].工程力学,2007,24(7):99-103, 121.
- [59] ZHOU X Y, WANG N W, XIONG W, et al. Multi-scale reliability analysis of FRP truss bridges with hybrid random and interval uncertainties[J]. Composite Structures, 2022, 297:115928.
- [60] ZHOU X Y, GOSLING P D, ULLAH Z, et al. Stochastic multi-scale finite element based reliability analysis for laminated composite structures[J]. Applied Mathematical Modelling,2017,45:457-473.
- [61] AKULA V M K. Multiscale reliability analysis of a composite stiffened panel[J]. Composite Structures,2014,116: 432-440.
- [62] FISH J, BAILAKANAVAR M, POWERS L, et al. Multiscale fatigue life prediction model for heterogeneous materials[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2012,91(10):1087-1104.
- [63] 郭焱斌,尹益辉,朱宝龙.双索面斜拉桥主梁抗弯强度的模糊可靠性分析[J].机械强度,2011,33(4):565-569.
- [64] 李云贵,赵国藩.基于模糊随机概率理论的可靠度分析模型[J].大连理工大学学报,1995,35(4):528-531.
- [65] 吕颖钊,贺拴海.缺损钢筋混凝土梁桥模糊可靠性评价模型[J].交通运输工程学报,2005,5(4):58-62.
- [66] 周建方,郑鼎聪,高冉,等.模糊变量与随机变量组合时模糊可靠度计算方法研究[J].工程力学,2021,38(10):12-23.
- [67] NIE X B, LI H B. A direct-integration-based structural reliability analysis method using non-probabilistic convex model[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2018,32:5063-5068.
- [68] FANG Y F, XIONG J B, TEE K F. Time-variant structural fuzzy reliability analysis under stochastic loads applied several times[J]. Structural Engineering and Mechanics, 2015,5(3):525-534.
- [69] MOUFTI S A, ZAYED T, ABUDABOUS S A. Defect-based condition assessment of concrete bridges:Fuzzy hierarchical evidential reasoning approach[J]. Transportation Research Record:Journal of the Transportation Research Board,2014, 2431(1):88-96.