

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.224



桥梁工程可靠度 2020 年度研究进展

汪斌, 汤港归, 唐继舜, 王伟旭

(西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031)

摘要: 由于自身固有属性的不确定性以及所处环境的复杂性, 桥梁在设计、施工、运营等不同阶段都需要具备足够的可靠性。为了解 2020 年桥梁工程可靠度研究与应用的最新动态, 查阅文献并对相关理论方法、不同阶段或环节的科研内容和成果进行归纳。在桥梁可靠度理论和方法方面, 引入 GPR 模型、径向基神经网络等方式得到隐式结构功能函数, 引入 Copula 理论把握多失效模式概率的关系; 采用概率可靠性和非概率可靠性方法、蒙特卡罗数值模拟、时变可靠度理论等进行可靠性评估。既有桥梁的技术状况及可靠度仍然是桥梁工程领域研究的热点, 自然环境条件下桥梁抗力与外荷载的时变模型是桥梁时变可靠度分析与寿命预测的重点。可靠度理论及分析方法在桥梁工程设计中得到逐步的发展, 考虑动态荷载作用随机性与结构参数随机性的动力可靠度研究与应用越来越多。

关键词: 桥梁工程; 可靠度; 研究进展; 2020 年

中图分类号: U446 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2022)01-0222-06

State-of-the-art review of reliability in bridge engineering in 2020

WANG Bin, TANG Gangui, TANG Jishun, WANG Weixu

(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China)

Abstract: Due to the uncertainty of the inherent properties and the complexity of the environment, bridges need to have sufficient reliability in different stages of design, construction, and operation. In order to understand the latest developments in the research and application of bridge engineering reliability in 2020, the relevant theoretical methods, scientific research content and results at different stages are summarized through literature review. In terms of the bridge reliability theory and methods, GPR models and radial basis neural networks are introduced to obtain the implicit structural function functions. Copula theory is introduced to consider the relationship between the probability of multiple failure modes. The probabilistic reliability and non-probabilistic reliability methods, Monte Carlo simulation, time-varying reliability theory, etc. are used for reliability evaluation. The technical status and reliability of existing bridges are still hot spots in the field of bridge engineering at home and abroad. The time-varying model of bridge resistance and external load under environmental conditions is the focus of the time-varying reliability analysis and the life prediction of bridges. Reliability theory and analysis methods have been gradually developed in bridge engineering design. There are more and more dynamic reliability studies and applications that consider the randomness of dynamic load action and the randomness of structural parameters.

Keywords: bridge engineering; reliability; research progress; 2020

近年来, 中国的桥梁建设取得了巨大的成就, 桥梁设计、施工、管养理论体系与技术也随之不断变化与改进。随着新建桥梁规模的不断提高, 所处桥位环境变得复杂, 对相关研究与技术人员提出了越来越高的要求。桥梁是一类复杂的

工程结构体系, 其传递受力的路径相对复杂, 材料种类与结构形式多样, 失效模式众多。由于自身各种固有属性的不确定性以及所处环境的复杂性, 桥梁在设计、施工、运营等不同阶段都面对着可靠性的挑战。笔者通过对文献进行梳理, 对

收稿日期: 2021-07-07

基金项目: 国家自然科学基金(51878579)

作者简介: 汪斌(1983-), 男, 副教授, 博士生导师, 主要从事桥梁风工程、车桥耦合振动、随机与可靠性等研究, E-mail: wangbinwvb@home.swjtu.edu.cn.

2020 年度桥梁工程在不同阶段、不同环节的可靠度研究及应用进行归纳,以期促进桥梁工程可靠度方向的发展与应用。

1 桥梁工程可靠度理论与方法

桥梁结构形式复杂,存在的失效模式众多。在复杂的结构形式与多种失效模式的共同影响下,桥梁结构的功能函数往往呈现出高度的非线性,并且没有明确的解析表达式,需要较大的样本点数量来构造隐式功能函数,导致计算分析工作量较大。常见的可靠度近似求解方法,例如一次二阶矩法等较难解决此类问题。黎恩华等^[1]将基于统计学的 GPR 模型、JC 法和可靠度指标矢量法相结合,提出了基于高斯过程回归理论的桥梁体系可靠度计算方法。该方法能够充分利用 GPR 模型在处理高维度、小样本以及非线性问题上的优势。何启龙等^[2]基于径向神经网络函数对拼宽 T 梁进行了荷载效应的回归分析,构建出了相应的隐函数。

与传统的概率可靠性方法一起,非概率可靠性理论也用于桥梁的可靠度评估。非概率可靠性理论的概念是将系统的波动范围与实际要求的变化范围进行比较,基于此计算得到结构的安全程度。李晓妮^[3]采用非概率可靠性分析方法,通过引入区间分析理论,建立了以非概率可靠性理论为基础的关于可靠度指标的计算分析模型。利用非概率可靠度理论评估混凝土桥梁耐久性时,基于少量的数据资料以及一些主观上的分布假设前提得到比较准确的结果。王敏容等^[4]将不确定参数描述为区间变量,建立了非概率可靠性模型,结合应力-强度干涉模型,以集合可靠度量非概率可靠性。不确定参数在区间均匀分布,当不确定参数的信息较少时,非概率可靠性模型就可以给加固后的轴压柱做出合理的可靠性评估。马涛^[5]提出了一种基于非概率可靠度理论的桥梁桩基竖向承载能力安全系数评估方法。通过结合非概率可靠度理论,在考虑结构参数随机性的前提下,求解桥梁桩基竖向承载能力安全系数,对于确定桥梁桩基竖向承载能力安全系数具有较好的适用性。

大多数研究只是简单地构造二元联结函数来考虑两种失效模式的联合失效,对于由多个构件和多种破坏模式组成的复杂桥梁结构,需要考虑多种破坏模式的联合破坏。Liu 等^[6]综合考虑多种失效准则,建立了桥梁系统可靠性评估中多个构件联合失效的多元联结函数,提出了一种基于多元关联的多失效准则和层次分析法(AHP-EW)的简支梁桥系统可靠性评估新方法。提出的方法可以更全面、更合理地评价桥梁系统的可靠性。罗辉等^[7]为找到多种失效模式之间的相关性,引入 Copula 理论度量构件失效模式间的相关关系,并构建联合分布函数从而得到了联合失效概率。这种方法可以应用于桥梁体系可靠度的计算,并且能够比较不同失效模式相关性对桥梁体系失效概率的影响。Tan 等^[8]利用隶属度函数定量表达铰链的模糊检测信息,转化为等效随机变量,用改进的铰链板法和响应面法构建了横向分布系数与铰节点损伤之间的函数关系,采用一阶二阶矩法计算了考虑铰节点损伤模糊检测信息的构件的可靠性。这是一种基于 Copula 理论建立了考虑构件失效可信度的不同失效准则的系统可靠性评估方法。

2 基于可靠度的桥梁设计与施工

桥梁工程设计过程中应考虑实际环境客观影响因素存

在的不确定性,获得综合满足安全性、耐久性、适用性、环保性、经济性、美观性等设计基本原则的优化设计方案。黄海新等^[9]以桥梁设计规范为基础,结合耐久性极限状态理论和可靠度理论,建立了具有实用化、模块化、集成化特征的混凝土 T 梁设计优化模型。通过可靠度约束模块控制桥梁的失效概率,降低了其使用风险。Zhang 等^[10]从“成本-效益”的角度,提出了最优结构参数比的概念。根据斜拉桥主梁的荷载和抗力统计参数以及有限元分析得到最不利弯矩,采用 JC 法计算结构可靠度指标。然后,计算不同结构参数比下的可靠性指标,通过数据拟合得到了可靠性指标与结构参数比的关系表达式。韦尧兵等^[11]针对钢桥的承载能力是否满足实际需求这一工程问题,提出了一种将应力-干涉理论应用于钢桥对接焊缝的设计方法。通过数值分析,在静荷载条件下进行了可靠度分析,对钢桥焊缝的可靠性设计具有一定适用性。Wang 等^[12]提出了一种将支持向量机与智能算法相结合的大跨度斜拉桥可靠度分析方法,采用通用极限范围法对桥梁结构体系的可靠度指标进行了评估。结果表明,斜拉破坏对整个结构体系的可靠度影响最大。王识岬等^[13]提出一种基于抛物线拟合原理的逆可靠度计算方法,并基于该方法进行了单轨梁设计安全系数的校核。

桥梁在正常使用过程下也会承受复杂时变的温度作用。樊健生等^[14]提出了基于可靠度理论的组合结构桥梁设计温度荷载模型,采用可靠度理论进行了组合桥梁设计温度荷载计算。通过 MATLAB 高效数值模型计算形成组合结构桥梁温度场时程数据,进一步利用极值模型获得了桥梁设计的温度荷载代表值,从而快速、高效地实现了对桥梁地理信息、结构参数等因素的考虑。提出的基于可靠度理论与 MATLAB 的钢筋混凝土组合结构桥梁设计温度荷载模型可实现任意地区组合结构桥梁温度场的精确计算,并显著提升了计算效率。

疲劳是设计过程中一个主要问题,桥梁通常承受高活载与恒载比和高应力循环频率的荷载而引发疲劳问题。微裂缝是引起桥梁结构疲劳的主要原因。在周期荷载的影响下,微裂缝不断扩大,降低结构承载性能并可能导致结构失效破坏。可将疲劳问题转化为全概率可靠度的求解问题,通过极限状态方程表示和反映疲劳失效程度,再以概率形式表达极限状态方程中的全部因素^[15]。目前,通过全概率可靠度的求解方式确定桥梁失效概率的应用日益广泛。Flanigan 等^[16]提出了一个概率疲劳可靠性评估框架,用于监测铁路桥梁组件的使用性能。推导的极限状态函数解释了平行眼杆疲劳与相对拉紧之间的耦合行为,对元件(即单个眼杆)和系统(即整个眼杆总成)可靠性指标值进行了评估。Han 等^[17]基于应力分析方法,提出了一种有效的大跨度钢桁架悬索桥在随机交通和风荷载联合作用下的疲劳可靠性评估框架。朱金等^[18]提出了沿海大跨斜拉桥拉索在随机车流、风和波浪荷载联合作用下拉索应力谱的计算方法和步骤,并基于线性疲劳累积损伤理论建立了斜拉桥拉索疲劳可靠度的计算框架。

桥梁施工是一项庞大且复杂的系统工程,任意环节出现错误和疏忽,都会大大降低结构施工期的安全可靠度。地质条件、施工地点、环境条件不同以及结构材料制作过程中难以控制的各种复杂因素等是桥梁施工阶段风险的内在因素。刘陆平^[19]对满堂支架现浇施工连续梁桥进行了确定性和可

靠性对比分析,通过考虑结构类型和荷载来建立表征结构性能的承载能力极限状态函数对结构进行可靠性分析。结果表明,确定性分析和可靠性分析结果有不同规律,不能单从确定性分析结果的大小来判断结构安全储备,需将确定性分析与可靠性分析相结合,才能对结构安全性能做出合理准确的判断与评价。

3 既有桥梁可靠度评估

由于桥梁自然老化、车辆荷载增加、复杂不利环境的影响以及养护维修措施的不足,部分桥梁可能出现结构损伤。既有桥梁损伤可能会导致桥梁结构承载能力和耐久性的降低,或不能满足运营要求。因此,既有桥梁的可靠度评估一直是国内外桥梁工程领域的热点问题。

在公路运输中,超大、超重设备的运输已日渐频繁。由于大件运输车辆的轴距、自重、尺寸均与一般车辆不同,其车辆荷载与规范规定的标准荷载差异较大。因此,大件运输车辆对经过的桥梁有可能造成损害。刘林等^[20]针对大件运输车辆对经过的桥梁是否造成损害及损害程度问题,运用理论分析和实验(检测)相结合的方法,借助科学理论和国家有关规范标准,分别从桥梁承载能力和可靠度评估角度,对大件运输车运输沿线的某混凝土空心板梁桥技术状况和可靠度指标等进行了评估分析。高文博等^[21]为实现大件运输车载下退化钢绞线斜拉索的安全评估,基于可靠度理论的两层次安全评估方法建立了设计基准期和正常运营荷载下的可靠度指标。两层次安全评估极限状态分别对应于不满足规范安全储备的状态与拉索断裂破坏这两种情况。Lu等^[22]提出了一种基于深度置信网络(DBNs)的随机交通荷载作用下斜拉桥系统可靠性评估新方法。考虑了结构的非线性和高阶静不定特性,建立了相应的数学模型。结果表明,DBNs能准确地反映结构非线性和不同系统行为下的力学行为,可以作为结构失效概率的元模型。Wang等^[23]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。袁阳光等^[24]以可靠度理论为基础,通过对在役混凝土桥梁构件运营阶段评估周期、评估基准期、评估目标可靠指标的分析确定,构建了能够同时考虑平稳车载过程、非平稳车载过程及构件抗力劣化进程非平稳性的概率极限状态评估方法。Wang^[25]考虑到在不利环境下,桥梁的运营状态会出现刚度、强度等性能劣化的现象,提出了一种全新的抗力退化随机模型,通过引入附加参数使得退化自相关和方差不严格依赖于均值。该方法可用于桥梁时变性的评估。程健等^[26]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。Shahbaznia等^[27]提出了一种新的基于可靠度的铁路桥梁结构损伤和荷载识别方法。由于车桥系统是时变的,所以利用有限元模型修正技术考虑存在的不确定性。同时将可靠度的方法和传统概率方法进行了比较。结果表明,在不确定性存在的情况下,基于可靠度的方法是对铁路桥梁进行损伤和荷载同时识别的最精确方法。

在大跨桥梁运营过程中,影响结构可靠性的因素较多,仅依赖定期的检查和结合规范进行状态评估是不够的。因

此,开发桥梁结构的实时监测装置,对既有桥梁结构整体承载能力和受力行为进行监控和状态评估已是一种趋势^[28]。桥梁健康监测系统在长期运营过程中积累了大量监测数据,可以通过有效分析和处理这些数据对既有桥梁结构的可靠性进行评定。樊学平等^[29]利用桥梁监测数据,建立了藤 Copula 技术与动态线性模型(DLM)贝叶斯递推过程相融合的贝叶斯动态藤 Copula 模型(BDVCM),并结合一次二阶矩(FOSM)方法,预测了危险监测点既有桥梁主体体系的动态可靠性。Dan等^[30]从桥梁结构监测的角度出发,提出了评价桥梁潜在倾覆风险的两条技术路线:1)基于抗倾覆稳定系数的交通荷载监测;2)基于支座转角控制的结构响应监测。李松辉等^[31]为了确定静载试验验证后钢筋混凝土筒支梁桥的限载取值,提出了一种考虑抗力修正系数和静载试验效率的钢筋混凝土筒支梁桥限载分析方法,为结构可靠度理论与桥梁监测领域相结合提供了一种思路。

4 桥梁时变可靠度与寿命预测

在桥梁的全寿命周期内,其结构会受到内部及外在的各种复杂因素的综合影响。桥梁从建成投入使用开始,其结构性能始终保持下降的趋势。随着服役年限的不断增长,其可靠性也逐渐下降。一方面,结构材料随时间的增长发生性能退化;另一方面,外部荷载较设计状态发生变化。混凝土桥梁在二氧化碳的作用下会出现碳化问题,碳化深度对混凝土桥梁的耐久性有很大影响。且混凝土碳化深度本质上具有随机性,因此需对混凝土碳化深度进行统计分析,确定其统计特性很有必要^[32]。张若男等^[33]采用基于可靠度理论和热传导理论的 2 种碳化寿命预测方法,结合 ANSYS 热分析模块模拟分析了混凝土碳化过程。Ma等^[34]提出了一种基于季节腐蚀疲劳损伤的钢筋混凝土老化结构概率寿命预测的新框架。对于钢筋锈蚀的研究,涉及的方面主要包括钢筋锈蚀梁的裂缝对钢筋锈蚀的影响预测,以及锈蚀钢筋的力学性能。Gao^[35]通过试验计算了钢筋的力学性能和时变可靠度,发现随着钢筋腐蚀时间的增加,钢筋的强度降低,混凝土的裂缝增加,桥梁的整体可靠性下降,表明在近海环境中氯离子的腐蚀会影响桥梁的整体属性。Heo^[36]提出了一种基于反映公路桥梁现场环境和检测数据的抗力退化模型。从预应力混凝土梁和钢筋混凝土板的使用周期、混凝土裂缝宽度两个方面评价了腐蚀环境对混凝土承载力的影响,所建立的基于性能的桥梁抗力退化模型可以用于桥梁的可靠性评估。

提前掌握桥梁的结构性能退化趋势,并及时采取有效的养护措施对桥梁结构的安全运营具有重大意义。陈树辉等^[37]从桥梁技术状况退化机理和影响因素出发,对蒙特卡罗预测模型、贝叶斯动态预测模型、时间序列分析预测模型、层次分析法预测模型、时变可靠度衰变预测模型等进行对比分析,指出了现阶段桥梁技术状况退化预测模型中存在的不足,认为应根据不同的桥梁结构形式采用相适应的技术状况退化预测模型,并结合不同种类的预测模型进行比较修正。这样能够弥补单一预测模型的局限性,使预测结果更加接近真实的退化状态。黄勇等^[38]建立了一种基于风险函数的时变可靠度分析方法。当荷载效应及抗力等随机变量存在时变特性时,这种方法能够实现任意基准期内可靠度的求解。

对于中小跨径混凝土桥梁而言,时变荷载过程主要为车

辆荷载过程。随着国内各地交通量的不断增加,车辆荷载呈现非平稳特性。对于时域范围内的连续非平稳随机过程,采用直接建模的方式难度极大。袁阳光等^[39]联合时域内的动态广义极值分布模型及蒙特卡罗模拟,实现了对连续非平稳车载过程的极值建模。基于 Gamma 过程对在役混凝土桥梁构件抗力非平稳劣化模型进行了建立及更新。该类结果的获取同时也可对在役桥梁全寿命维修策略制定等工作提供直接参考。陈龙等^[40]采用逆高斯随机过程描述桥梁抗力退化情况,同时采用复合泊松过程描述车辆荷载效应,建立了基于抗力-车辆荷载效应双随机过程的在役钢筋混凝土桥梁构件时变可靠度分析方法,推导了相应的时变可靠度计算公式。邓露等^[41]为了分析车辆荷载对钢筋混凝土桥梁可靠度和加固费用的影响,采用蒙特卡罗法模拟了不同轴限值下的随机车流情况,将时变可靠度和加固设计方案结合起来,得到了由可靠度指标确定的桥梁剩余使用寿命和相应的加固方案。

结合桥梁结构材料的退化性能与外荷载的时变变化可能性,可开展既有桥梁的寿命预测。Kia 等^[42]建立了一个能真实预测混凝土桥面状态的智能系统,该系统可对桥梁剩余使用寿命进行预测。通过对 150 个建模桥梁点的两种可靠性因素的监测,探讨了一个世纪以来可靠性生命周期评估对桥梁养护成本性能的作用。Kim 等^[43]提出了一种新的基于概率的桥梁可靠度指标确定方法,用于桥梁网络级的寿命管理。利用结构重要度指标确定了桥梁的目标可靠度指标,并通过优化过程进行计算。在结构重要指标法中,根据网络中桥梁结构的重要指标来确定桥梁的目标可靠度指标。Wu 等^[44]提出了一种基于全寿命周期系统可靠度的方法,该方法可以明确地求解冲孔几何形状和应力历史。建立了用修改后的荷载传递曲线实现的有限差分模型,用来预测桩的性能。Yuan 等^[45]提出了一种碳纤维布加固钢筋混凝土桥的可靠性和剩余寿命评估方法。该方法考虑了材料特性、几何参数、载荷模型和随时间变化的抗力模型的不确定性,将逆可靠度法与碳纤维布加固钢筋混凝土桥荷载和抗力的计算方法相结合。曹智骅等^[46]采用蒙特卡罗分析法,利用可靠度指标来量化加固后的桥梁使用寿命,对可靠度方程涉及的混凝土强度、钢筋锈蚀截面、钢筋锈蚀屈服强度等抗力时变因素的影响参数进行了分析说明,并且对恒活载的时变可靠度分布统计规律进行了分析,结合规范对既有钢筋混凝土桥梁正常使用极限状态的判别条件,得到了一种适用于桥梁正常使用阶段的可靠度量方法。

5 桥梁动力灾害可靠度分析

车辆在桥上运营时施加给桥梁移动荷载作用形成动态激扰力,桥梁的实时变形同时反馈形成车辆运行的动态边界,这种复杂的时变动力相互作用通常称为车桥耦合振动。车桥耦合振动是一种复杂的自激振动行为,系统内部参数众多,包括桥梁结构形式与参数、车辆类型与参数、轨道或路面结构与不平顺、线路曲线等。耦合系统内部参数的随机性使得常规的确定性车桥耦合振动分析结果的代表性不够。考虑系统内部的随机性,基于可靠度方法开展车桥耦合振动分析或动力响应评价是全面、准确评价车辆对桥梁动力作用的重要途径。Jin 等^[47]以重载铁路曲线桥梁为对象,模拟了重载列车作用下曲线轨道-桥梁系统的三维动力行为。展开随

机参数的动态响应分析,采用响应面技术研究了每个敏感随机参数的影响和系统的失效概率。表明影响桥梁动力响应的重要随机因素包括主梁弹性模量与阻尼比、道砟厚度与主梁弹性模量的交叉作用。随着曲线半径的减小,系统的横向、竖向可靠性降低。通过对不同曲线半径、车辆轴重、轨道不平顺对系统失效概率的比较分析,发现曲线半径小于 800 m 时横向失效概率急剧增加,车辆轴重、轨道不平顺对车桥动力系统的失效有显著的影响。

风致颤振是一种发散性风致振动现象,在大跨度桥梁设计中需要得到克服。一般通过确定颤振临界风速来评价颤振性能的优劣。由于风环境、桥梁动力参数等的随机性,颤振临界风速也具有不确定性。姜保定等^[48]将概率密度演化方法与桥梁颤振多模态耦合分析方法相结合,考虑桥梁质量、刚度、阻尼比的不确定性与颤振导数的不确定性,获得了不同模态阻尼比及频率下的概率密度演化过程,按 99% 置信区间确定颤振临界风速。考虑风致颤振中的随机性,基于可靠度得到的颤振临界风速低于常规确定性方法得到的颤振临界风速。

近年来,地震易损性是桥梁可靠度分析的热点研究方向。在地震作用下,桥梁易损性可能会导致巨大的经济损失,尤其是那些位于地震高发地带的桥梁。Soleimani^[49]开展了非线性时程分析以研究结构不规则的桥梁在不确定条件下常规高度墩、高墩混凝土箱梁桥的可靠度。不确定性来源包括地震动、结构材料和桥梁构造(规则性),发现桥梁构造形式对抗震性能有重要影响,特别是对高墩桥梁表现得更加明显。随着墩高的增加,桥梁抗震易损性增大。跨越江河的部分震区桥梁随着地震过程中基础位置的变化可能发生冲刷深度增加的现象,地震与冲刷交叉影响恶化了桥梁的抗震性能。周敦等^[50]采用蒙特卡罗数值模拟法确定了冲刷深度的分布函数,采用有限元软件建立了不同冲刷深度下的全桥空间有限元动力模型,并进行了 48 条地震波下的桥梁动力分析。计算了不同冲刷深度下的地震作用效应分布函数,并采用直接积分法求得桥梁基础的失效概率及可靠度指标,可为桥梁在冲刷与地震联合作用下的风险评估和设计提供重要参考。梅建松等^[51]为分析杆系拱桥在非平稳地震随机荷载过程中响应及其可靠度,利用 MIDAS 建立有限元模型,采用概率密度演变的方法进行随机振动分析,获得了结构位移响应的概率密度函数随时间演化的规律,表明概率密度演化方法能够有效应用于杆系拱桥的随机非平稳地震响应分析及可靠度分析。

为分析汽车撞击作用下桥墩的受力特点与可靠度,王向阳等^[52]模拟了汽车桥墩撞击过程,拟合得到撞击力的表达式。考虑车辆质量均匀分布、车辆速度均匀分布,撞击力具有正态分布特征。拟定桥墩混凝土弹性模量为正态分布变量,在撞击作用下桥梁关键截面内力呈现正态分布规律。桥墩在车辆撞击作用下更易发生剪切破坏,墩柱抗剪承载力可靠度受混凝土强度影响大。

6 总结

笔者查阅公开发表文献,对 2020 年度桥梁工程可靠度相关研究进行归纳。相关研究内容总结如下:

1) 确定极限状态功能函数是可靠度分析的基础。然而

桥梁结构失效模式众多且复杂,极限状态功能函数通常难以显式表达。借鉴不同的策略构造极限状态功能函数的隐式近似关系成为一种重要的选择,如 GPR 模型、径向基神经网络等。在原始资料数据量受限时,可采用非概率可靠度理论进行可靠性评估。引入 Copula 理论,建立不同失效模式之间的概率关系,可用于对桥梁结构多失效模式进行系统可靠性评估。

2)结合桥梁发展最新理念,可靠度理论及分析方法在桥梁工程设计与方案优化过程、施工方案设计中得到逐步的发展。提出了基于可靠度理论的组合结构桥梁温度计算模式,考虑到交通荷载、风、波浪等多种荷载共同作用下,钢桥或钢构件的疲劳可靠性评估框架正在逐步完善。

3)既有桥梁的技术状况及可靠度仍然是国内外桥梁工程领域的热点。结合健康监测系统,可以通过有效分析和处理监测数据开展既有桥梁结构的可靠性评定。

4)自然环境条件下混凝土碳化、钢筋锈蚀等材料时变劣化下桥梁抗力的平稳、非平稳特性与可靠度模型,桥梁车辆荷载的非平稳变化是桥梁时变可靠度分析与寿命预测的重点。

5)考虑动态荷载作用随机性与结构参数随机性的桥梁结构动力可靠度评价日益重要,在风振、车振、地震、撞击等作用上得到越来越多的研究与应用。年度发现主要包括:基于可靠度方法得到的颤振临界风速低于常规确定性方法得到的颤振临界风速;铁路桥梁曲线半径小于 800 m 时横向失效概率急剧增加;桥梁构造形式对抗震性能有重要影响;地震与冲刷交叉影响恶化了桥梁的抗震性能。

参考文献:

- [1] 黎恩华,陈忠宇,毛林. 基于 GPR 的 PC 连续梁桥体系可靠度分析[J]. 工程与建设, 2020, 34(2): 194-196.
- [2] 何启龙,邬晓光,李艺林,等. 基于 RBF-SVM 的拼宽预应力 T 梁桥抗弯可靠度分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2020, 53(5): 424-429.
- [3] 李晓妮. 混凝土桥梁耐久性评估新方法[J]. 交通世界, 2020(26): 131-132.
- [4] 王敏容,樊建平,胡隽. 非概率可靠性在轴压柱加固评估中的应用[J]. 土木工程与管理学报, 2020, 37(1): 87-92.
- [5] 马涛. 基于非概率可靠度的桥梁桩基承载能力安全系数研究[J]. 黑龙江交通科技, 2020, 43(9): 142-143.
- [6] LIU H B, WANG X R, TAN G J, et al. System reliability evaluation of a bridge structure based on multivariate copulas and the AHP-EW method that considers multiple failure criteria [J]. Applied Sciences, 2020, 10(4): 1399.
- [7] 罗辉,李彤,熊凯文. 基于 Copula 理论的桥梁可靠度计算[J]. 土木工程与管理学报, 2020, 37(4): 1-7.
- [8] TAN G J, KONG Q W, WANG L L, et al. Reliability evaluation of hinged slab bridge considering hinge joints damage and member failure credibility [J]. Applied Sciences, 2020, 10(14): 4824.
- [9] 黄海新,孙文豪,程寿山. 钢筋混凝土 T 梁桥模块化集

成设计优化与实践[J]. 混凝土, 2020(6): 152-159, 162.

- [10] ZHANG Z H, LI W B, DING Z X, et al. An approach to the selection of target reliability index of Cable-stayed bridge's main girder based on optimal structural parameter ratio from cost-benefit analysis [J]. Structures, 2020, 28: 2221-2231.
- [11] 韦尧兵,张如鹏,刘俭辉,等. 应力-强度干涉理论在对接焊缝中的应用[J]. 兰州理工大学学报, 2020, 46(6): 168-172.
- [12] WANG Y, DUAN K K, LIU L J, et al. Reliability analysis of large span cable-stayed bridges based on support vector machine [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 446: 052103.
- [13] 王识岬,梁力. 基于逆可靠度的单轨梁容许应力计算方法[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(3): 91-98.
- [14] 樊健生,刘诚,刘宇飞. 钢-混凝土组合梁桥温度场与温度效应研究综述[J]. 中国公路学报, 2020, 33(4): 1-13.
- [15] 黎峰,彭孝旺. 刚构桥疲劳设计要点[J]. 交通世界, 2020(25): 140-141.
- [16] FLANIGAN K A, LYNCH J P, ETTOUNEY M. Probabilistic fatigue assessment of monitored railroad bridge components using long-term response data in a reliability framework [J]. Structural Health Monitoring, 2020, 19(6): 2122-2142.
- [17] HAN Y, LI K, CAI C S, et al. Fatigue reliability assessment of long-span steel-truss suspension bridges under the combined action of random traffic and wind loads [J]. Journal of Bridge Engineering, 2020, 25(3): 04020003.
- [18] 朱金,吴梦雪,尹力,等. 随机车流-风联合作用下沿海大跨度斜拉桥拉索疲劳寿命预测[J]. 中国公路学报, 2020, 33(11): 182-194.
- [19] 刘陆平. 基于不同规范的连续梁桥确定性及其可靠性对比分析[J]. 城市道桥与防洪, 2020(2): 159-162, 19.
- [20] 刘林,郎凯. 大件运输过程中桥梁技术状况检测与评估[J]. 城市道桥与防洪, 2020(6): 169-171, 180, 22.
- [21] 高文博,袁阳光,黄平明,等. 大件运输车载下考虑强度退化过程的钢绞线斜拉索安全评估[J]. 中国公路学报, 2020, 33(8): 169-181.
- [22] LU N W, LIU Y, NOORI M, et al. System reliability assessment of cable-supported bridges under stochastic traffic loads based on deep belief networks [J]. Applied Sciences, 2020, 10(22): 8049.
- [23] WANG H, HU C H, NGUYỄN T V, et al. Depth evaluation of submerged pile bents [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2020, 34(1): 06019003.
- [24] 袁阳光,韩万水,李光玲,等. 考虑非平稳因素的混凝土桥梁概率极限状态评估[J]. 工程力学, 2020, 37(8): 167-178.

- [25] WANG C. A stochastic process model for resistance deterioration of aging bridges [J]. *Advances in Bridge Engineering*, 2020, 1(1): 1-9.
- [26] 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.
- [27] SHAHBAZANIA M, MIRZAEI A, RAISSI DEHKORDI M. A new model updating procedure for reliability-based damage and load identification of railway bridges [J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2020, 24(3): 890-901.
- [28] ZHOU G D, YI T H, LI W J, et al. Standardization construction and development trend of bridge health monitoring systems in China [J]. *Advances in Bridge Engineering*, 2020, 1(1): 1-18.
- [29] 樊学平,杨光红,肖青凯,等. 考虑安全性的桥梁主梁体系可靠性动态藤 Copula 预测[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(2): 165-175.
- [30] DAN D H, YU X W, YAN X F, et al. Monitoring and evaluation of overturning resistance of box girder bridges based on time-varying reliability analysis [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2020, 34(1): 04019101.
- [31] 李松辉,李灿,聂瑞锋,等. 考虑抗力修正系数和静载试验效率的 RC 简支梁桥限载取值[J]. *土木工程学报*, 2020, 53(10): 99-105.
- [32] 王常青. 运营期混凝土桥梁碳化深度统计分析[J]. *交通世界*, 2020(26): 108-109, 112.
- [33] 张若男,蔺鹏臻,保琛,等. 铁路 56 m 简支箱梁的碳化寿命预测[J]. *铁道建筑*, 2020, 60(9): 26-30.
- [34] MA Y F, GUO Z Z, WANG L, et al. Probabilistic life prediction for reinforced concrete structures subjected to seasonal corrosion-fatigue damage [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2020, 146(7): 04020117.
- [35] Gao Y H. Influence of chloride ion corrosion on the performance of reinforced concrete beam bridge in offshore environment [J]. *Archives of Engineering*, 2020, 66(2): 253-265.
- [36] HEO W H. Performance-based reliability estimates for highway bridges considering previous inspection data [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(5): 1873.
- [37] 陈树辉,呼明亮,朱三凡,等. 基于退化因素机理的桥梁技术状况退化预测模型研究[J]. *市政技术*, 2020, 38(3): 54-60.
- [38] 黄勇,马永,刘经纬,等. 联合时变可靠度与成本优化的桥梁构件升级改造策略[J]. *公路交通科技(应用技术版)*, 2020, 16(10): 209-213.
- [39] 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.
- [40] 陈龙,黄天立. 基于贝叶斯更新和逆高斯过程的在役钢筋混凝土桥梁构件可靠度动态预测方法[J]. *工程力学*, 2020, 37(4): 186-195.
- [41] 邓露,王涛,何钰龙,等. 车辆轴限对钢筋混凝土桥梁可靠度和加固费用的影响[J]. *中国公路学报*, 2020, 33(5): 92-100.
- [42] KIA S, SHAHHOSSEINI V, SEBT M H, et al. Reliability-based life cycle assessment of the concrete slab in bridges [J]. *Civil and Environmental Engineering*, 2020, 16(1): 170-183.
- [43] KIM S, GE B X, FRANGOPOL D M. Optimum target reliability determination for efficient service life management of bridge networks [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2020, 25(10): 04020087.
- [44] WU Z Y, LUO Z. Life-cycle system reliability-based approach for bridge pile foundations under scour conditions [J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2020, 24(2): 412-423.
- [45] YUAN H Y, HOU W, REN L P, et al. Reliability assessment and residual life estimation of concrete girder bridges strengthened by carbon fiber during the service stage [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 2020: 1-11.
- [46] 曹智骅,杨林恺. 粘贴钢板法加固桥梁可靠度分析[J]. *广东公路交通*, 2020, 46(5): 43-46, 51.
- [47] JIN S, FENG H D. Reliability assessment of a curved heavy-haul railway track-bridge system [J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2020, 16(3): 465-480.
- [48] 姜保宋,周志勇,唐峰. 桥梁颤振临界风速的概率密度演化计算[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2020, 52(3): 59-67.
- [49] SOLEIMANI F. Propagation and quantification of uncertainty in the vulnerability estimation of tall concrete bridges [J]. *Engineering Structures*, 2020, 202: 109812.
- [50] 周枚,赵威,石雄伟,等. 高烈度软土地场地桥梁地震与冲刷联合作用效应研究[J]. *振动与冲击*, 2020, 39(8): 88-98.
- [51] 梅建松,袁涌. 杆系拱桥随机地震响应及抗震可靠度分析[J]. *公路工程*, 2020, 45(4): 131-135.
- [52] 王向阳,吴琼,张林凯. 基于 LS-DYNA 的车-桥墩碰撞及可靠度研究[J]. *公路交通科技*, 2020, 37(5): 64-72.

(编辑 崔守奎)