



斜拉索疲劳动力可靠性及随机跨阈解析研究综述

张振浩, 袁 方, 毛艺程

(长沙理工大学 土木与环境工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要:大跨度斜拉桥斜拉索因长期承受随机动力荷载与不利环境的耦合作用,易发生疲劳损伤失效。斜拉索疲劳可靠性分析能够为优化斜拉索的可靠性设计与服役期运营维护提供科学依据。结合近年来的研究进展,系统梳理了随机跨阈解析、疲劳累积损伤与斜拉索可靠性评估研究现状,融合随机过程跨阈解析理论,构建斜拉索疲劳可靠性评估新视角。本文结果可为建立更精确的斜拉索疲劳可靠性评估体系提供理论参考与技术路径。

关键词:斜拉索; 疲劳损伤; 随机过程; 跨阈概率解析; 可靠性评估

中图分类号:U441

文献标志码:A

文章编号:1673-8993(2025)12-0001-10

doi:10.13402/j.gcjs.2025.12.144

Review of research on fatigue dynamic reliability of stay cables and stochastic cross-threshold analysis

ZHANG Zhenhao, YUAN Fang, MAO Yicheng

(School of Civil and Environmental Engineering, Changsha University of
Science & Technology, Changsha 410114, Hunan, China)

Abstract: The cable of long-span cable-stayed bridge is prone to fatigue damage and failure due to the coupling effect of random dynamic load and unfavorable environment for a long time. The fatigue reliability analysis of stay cables can provide a scientific basis for optimizing the reliability design and service operation and maintenance of stay cables. Based on the research progress in recent years, this paper systematically reviews the research status of random cross-threshold analysis, fatigue cumulative damage and cable-stayed cable reliability evaluation. Combining the random process cross-threshold analysis theory, a new perspective of cable-stayed cable fatigue reliability evaluation is constructed, aiming to provide theoretical reference and technical path for establishing a more accurate cable-stayed cable fatigue reliability evaluation system.

Key words: stay cable; fatigue damage; random process; cross-threshold probability analysis; reliability assessment

斜拉桥拉索长期承受随机动力荷载与恶劣环境的耦合作用,在循环应力与腐蚀效应叠加下极易引发疲劳损伤累积,导致断裂风险增加。近年来,国内外多起因拉索疲劳失效引发的桥梁事故表明,既有可靠性分析方法难以准确评估拉索疲劳动力可靠性。斜拉索疲劳可靠性评估研究可以揭示其在随机动力荷载作用下的疲劳累积损伤演化机制,为精细化拉索可靠性设计与运营维护提

供科学依据^[1]。

随机过程跨越阈值的概率分析是求解结构动力可靠度的关键。随机过程跨阈问题包括首次跨阈问题(first-passage problem)和多次跨阈问题(multi-passage problem),但由于随机过程的高维复杂概率分布、路径依赖性(或记忆性)、时间尺度等原因,获得解析解较为困难。目前,即使对于首次跨阈问题的精确解析解,都是结构动力可

收稿日期: 2025-04-29

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52478130);湖南省科技人才托举工程项目(2023TJ-Z17)

作者简介: 张振浩(1980—),男,教授,从事结构动力可靠度理论及其应用研究。

靠性分析的瓶颈之一^[2]。采用数值方法虽然可以对随机过程跨阈概率进行分析求解,但存在计算量大的缺陷。而随机过程跨阈概率的解析分析,不但能提供具有精确性和计算简便性的解析解,更有助于揭示随机跨阈问题的内在概率机制和随机行为特征,具有重要的理论意义和工程价值。

基于随机过程跨阈概率解析的斜拉索疲劳可靠性评估主要涉及“随机过程跨阈概率分析”“结构疲劳累积损伤随机过程与可靠性分析”“斜拉索长期服役下疲劳可靠度评估”等 3 个核心内容。根据结构动力可靠度理论,建立斜拉索应力-损伤随机过程模型以准确表征其疲劳累积损伤演化的随机规律或机制,突破随机过程跨阈概率的精确解析计算,从而对斜拉索长期服役下的随机疲劳累积损伤及可靠性进行高精度、高效分析与评估,并根据疲劳累积损伤随机过程制定拉索更换或维护策略。本文分别对其研究现状进行详细阐述,并对未来的发展趋势进行总结,为研究人员进一步研究更精确的斜拉索疲劳可靠性评估体系提供参考。

1 随机过程跨阈概率分析

1.1 随机过程首次跨阈概率分析

求解随机过程首次跨阈概率的经典方法是 Poisson 过程法^[3]及其相关改进方法^[4],在过去的几十年中,Poisson 过程法仍然在不断地改进与发展。LANGLEY^[5]构造指数衰减模型来描述首次跨阈时间概率分布,给出了平稳高斯随机过程首次跨阈概率新的近似解。GHAZIZADEH 等^[6]对 Vanmarcke 风险函数进行改进提出了新的首次跨阈失效概率分析方法,相比 Poisson 过程法和 Markov 过程法,其分析精度更高。但 Poisson 过程法及其相关改进方法都采用了严苛的数学假定,随后又发展了随机过程首次跨阈概率分析的级数分析法,包括首次跨阈时间概率密度的积分方程级^[7]和分析首次跨阈失效的 Engelund-Rackwitz 无穷级^[8]。上述方法均属于非精确解析计算方法,仅能提供随机过程首次跨阈概率的近似解。Monte-Carlo 模拟法是分析包括首次跨阈概率在内的可靠性问题的通用方法,但该方法非解析方法,尽管样本方

差缩减等技术^[9]提高了计算效率,但相比于解析法仍较耗费机时。

从 20 世纪 50 年代以来研究者们进行了首次跨阈问题精确严密解析解法的研究以及各种努力尝试,但在不需要假定的精确解析计算方法和结果方面成果仍较少。DARLING 等^[10]率先研究了连续马尔科夫过程(即扩散过程)首跨概率的解析计算方法。ZHANG 等^[11]根据施工安全风险演化为事故的过程符合马尔科夫过程无后效性的特点,推导出了基于马尔科夫过程的风险-事故过程首次跨阈时间概率密度函数的解析解。实质上,目前已获得首跨概率精确解析显式解的随机过程只有 Wiener 过程、Ornstein-Uhlenbeck 过程、Feller 过程、Gauss-Markov 过程以及其衍生的随机过程^[12-13]。Wiener 过程是随机过程理论中的一个基础性模型,在概率结构上,Wiener 过程具有对称性,由此根据反射原理(reflection principle)可推得其首次跨阈时间概率密度函数的精确解析解。ZHANG 等^[14]利用 Wiener 过程的对称性和马尔科夫性质,推导出了 Wiener 过程首次跨阈时间概率分布函数的精确解析解,并将其应用于混凝土结构的耐久性和可靠性评估。上述几种随机过程的概率结构具有非常紧密的联系,如 Ornstein-Uhlenbeck 过程是平稳 Gauss-Markov 过程,Wiener 过程是非平稳 Gauss-Markov 过程。因此,实质上并非几类概率结构完全不同的随机过程都获得了其首次跨阈概率的精确解析解。以上研究所用的方法为精确的解析方法,所得的结果也都是精确的解析解。对于除此之外的其他随机过程,目前首次跨阈问题的精确解析解未曾获得,仅知道首跨时间概率分布是某些积分方程的解。例如,SACERDOTE 等^[15]研究了一维扩散过程在两个时变边界之间的首跨时间的联合分布,通过建立积分方程系统并提出数值算法来求解这些方程。ZUCCA 等^[16]研究了维纳过程的首跨时间问题,利用一个非线性沃尔泰拉积分方程(VIE)来描述边界和首跨时间分布之间的关系。

1.2 随机过程多次跨阈概率分析

随机过程多次跨阈概率求解在结构疲劳可靠性分析中起着至关重要的作用,它是量化分析随

机累积损伤的关键之一。首次跨阈问题的研究已经开展了半个多世纪,而多次跨阈问题分析难度更大,几乎一直未涉足该领域。随机过程跨阈概率精确解析计算困难的原因,在于随机过程的超高维复杂性,它的完整描述需要知道一切有限时间集 $\{t_i\}$ 上的随机变量 $\{X(t_i)\}$ 的联合概率分布族。ZHANG 等^[17]在不依赖任何概率分布假设的条件下,研究获得了 Wiener 过程跨阈持续时间(即与安全界限任意两次相邻交叉的时间间隔)的概率密度函数精确解析解,并将其应用于系统可靠性、结构疲劳可靠性评估上。ZHANG 等^[18]通过分析疲劳累积损伤与跨阈持续时间的关系,推导出基于 Wiener 过程的疲劳累积损伤指数,并建立了结构疲劳可靠性的计算公式,进一步提高结构疲劳可靠性分析的准确性。

2 结构疲劳累积损伤随机过程与可靠性分析

2.1 动力可靠性分析的结构破坏机制

结构动力可靠性分析有首次超越破坏和疲劳破坏两种基本的破坏机制。首次超越破坏机制以结构关键响应或效应(如控制点应力、应变、位移等)首次超越安全阈值作为破坏判据。疲劳破坏机制则表征结构在随机动力激励持续作用下,其动力响应或效应在不高的区间往复循环,最后由于累积损伤或裂纹扩张超越临界阈值导致失效。

在疲劳破坏分析领域,表征结构疲劳效应发展-破坏过程主要基于两类核心理论模型:累积损伤机制与裂纹扩展准则。累积损伤理论模型将疲劳破坏过程看作损伤不断累积的过程,当累积损伤首次突破临界阈值时,判定结构失效。裂纹扩展理论模型将疲劳破坏过程划分为三个演化阶段:裂纹的形成、扩张和断裂,结构最终失效源于应力首次超越剩余强度。国内外学者们通过 $S-N$ 疲劳寿命曲线、累积损伤理论以及可靠度理论,并结合现场和模型试验数据开展了大量的研究工作,建立了结构疲劳可靠度评估的基本框架。

2.2 疲劳损伤累积法则

长期服役下的结构疲劳累积损伤属于高周疲劳问题,高周疲劳损伤累积理论可分为线性损伤累积法则和非线性损伤累积法则。

2.2.1 线性损伤累积法则

经典 Palmgren-Miner 法则^[19]认为疲劳损伤与加载循环比成正比关系,荷载历程中所有荷载产生的损伤可单独计算,并按线性累加。Miner 法则形式简单、计算方便,但该法则对失效的过程机理进行了简化。BUCH^[20]提出了相对 Miner 法则,指出损伤阈值并非数值恒为 1 的常量,为了更准确地进行寿命估算,须开展大量疲劳试验以获取各类构件在典型工况和服役荷载谱下的损伤阈值。CORTEN 和 DOLAN 建立了 Corten-Dolan 模型,其与 Miner 法则的主要区别在于其将 $S-N$ 曲线的斜率参数 m 用损伤指数 d 值替换,是一种修正的线性损伤累积理论。MANSON 等^[21]认为疲劳是一个至少两阶段的过程(裂纹萌生和扩展),不同寿命水平下两阶段的发展速率不同,因此需要两个损伤规则,提出了双线性损伤规则(DLDR)和双损伤曲线法(DDCA)。ZHU 等^[22]提出了一种改进的线性损伤累积法则,考虑不同载荷序列下低振幅载荷的损伤和强化效应,采用模糊集方法来实现;通过引入强化函数和模糊集理论,相比传统 Miner 规则,能更准确可靠地预测疲劳寿命。KWOFFIE 等^[23]提出了一种基于疲劳驱动应力的方法,用于在变幅载荷下预测疲劳损伤和剩余寿命,比传统的 Miner 模型能更好地估计实验数据。AGHOURY 等^[24]提出了一种基于虚拟目标寿命曲线(VTLC)的疲劳应力寿命损伤累积模型,用于预测变幅载荷下结构的剩余疲劳寿命;该模型通过引入时间维度扩展了传统的 $S-N$ 曲线,能够模拟非均匀疲劳载荷的影响,并考虑了应力水平依赖性和载荷序列效应。此外,改进的 Miner 线性累积损伤理论还包括 Freudenthal-Heller 理论^[25]、Altus 化学-机械模型^[26]、Kramer 表面应力模型^[27]、Consistent Miner 法则^[28]和 Haibach 修正法则^[29]等。

2.2.2 非线性损伤累积法则

非线性损伤累积法则主要涵盖以下模型:①损伤曲线模型。MARCO 等^[30]基于荷载顺序加载试验数据,构建了考虑荷载水平相关的损伤曲线模型。②基于疲劳极限衰减的非线性损伤模型。GATTS^[31]、BUI-QUOC^[32]提出了基于疲劳极限衰减的非线性损伤模型。③基于 $S-N$ 曲线转移的非

线性损伤模型。SUBRAMANYAN^[33]构建了基于 $S-N$ 曲线拐点汇聚的非线性损伤累积模型。该类模型还包括 BEN-AMOUZ 模型^[34]、LEIPHOLZ 模型^[35]、胡明敏模型^[36]等。④基于能量准则的非线性损伤模型。NIU 等^[37]构建了一种基于塑性应变能变化的疲劳损伤模型。LEIS^[38]根据应变寿命公式将损伤参数与疲劳寿命之间建立联系,提出了一种与 SWT 参数模型类似的非线性损伤模型。此外,还有基于不同的能量理论提出的各种不同形式的非线性损伤模型,如 Kujuwsky-Ellyin 模型^[39]、Golos-Ellyin 模型^[40]、Kliman 理论^[41]等。⑤基于连续损伤力学理论的非线性损伤模型。CHABOCHE 等^[42]将连续损伤力学理论应用于疲劳损伤研究和寿命预测,揭示损伤的演化过程与荷载历程、材料属性、荷载循环等密切相关。此外,DATTOMA 等^[43]、DÖRING 等^[44]、CHAMAT 等^[45]等提出相应的损伤模型,这些模型在作用机理和形式的描述上均与 Chaboche 模型类似,主要区别在于模型参数的数目、参数确定所需要的试验量、模型的复杂程度及其适用范围。⑥损伤应力模型。损伤应力的概念是基于 $S-N$ 曲线提出的,其物理背景为:如果损伤发展的物理状态相同,则疲劳寿命仅与荷载的加载状态有关。GARCIA 等^[46]基于损伤应力的概念提出了一种损伤变量描述方法。MESMACQUE 等^[47]和 DJEBLI 等^[48]致力于解决传统疲劳损伤累积模型在面对变幅荷载和复杂加载时的不足,通过引入新的参数和考虑加载序列的影响,提出了不同的疲劳损伤应力模型,并对模型的合理性进行了大量试验验证。

2.3 基于随机过程的结构疲劳损伤累积过程研究

疲劳荷载作用下的结构累积损伤发展过程具有很强的随机性,疲劳可靠性分析必须考虑结构损伤累积过程的不确定性。但已有疲劳可靠性分析方法多从随机变量的角度进行,从随机过程的角度刻画结构累积损伤发展过程并进行结构疲劳可靠性分析更科学、准确。TANAKA 等^[49]采用扩展的 Markov 过程近似方法,考虑了材料的不均匀性,推导出裂纹长度分布函数,并分析了初始裂纹尺寸分布对结构可靠性的影响。GAO 等^[50]、LI 等^[51]构建基于物理综合法和概率密度演化方法

(PDEM)的创新性分析手段,用于评估混凝土桥梁在随机荷载作用下的疲劳可靠性。WILKIE 等^[52]建立了一种基于高斯过程回归的计算框架,用于构建海上风力发电机疲劳损伤的代理模型。KIM 等^[53-54]提出了船舶和海洋结构在宽频带高斯和非高斯随机载荷作用下的疲劳损伤评估模型。HAO 等^[55]提出了一种扩展的反高斯过程模型,该模型考虑了偏态正态随机效应和测量误差,并推导出了结构疲劳寿命的概率分布。ZHANG 等^[56]结合 Gamma 过程建模和维护成本分析的方法,提出了用于评估海上风力发电机叶片的疲劳损伤和制定维护策略的分析方法。BENASCIUTTI 等^[57-58]提出了基于平稳宽带非高斯随机过程和双峰高斯随机过程的疲劳累积损伤评估方法。ZHANG 等^[59]采用非均匀复合泊松过程描述日常随机车流,提出了一种基于结构健康监测数据的正交异性钢桥疲劳裂纹评估模型。顾怡等^[60]从疲劳损伤的定义出发,基于随机过程理论框架,构建累积损伤服从对数正态分布特性的结构元件疲劳可靠性评估方法。GAO 等^[61]基于概率密度演化方法(PDEM),提出一种新型非线性时变疲劳可靠性分析方法,能更准确高效地估计时变疲劳可靠性。

当前应用随机过程来描述或分析结构疲劳累积损伤发展过程的研究工作汇总如表 1 所示。可见,研究基本上使用既有随机过程(马尔科夫过程、复合泊松过程、高斯过程, Gamma 过程等)对累积损伤或裂纹扩展过程进行描述或分析。

2.4 疲劳可靠性分析方法

当前(高周)疲劳累积损伤的疲劳可靠度分析方法建立在确定性疲劳损伤累积理论的基础上,通过引入概率统计理论表征损伤发展过程中的不确定性^[62]。疲劳可靠性研究仍主要基于 Miner 准则,而累积损伤则主要考虑了应力循环次数和应力幅值的影响。倪侃等^[63]分析了损伤累积过程应满足的基本条件,建立了等幅加载下疲劳中值曲面方程和变幅加载下二维概率 Miner 法则,同时针对 Wirsching 模型存在的不自洽性提出了改进方法。RATHOD 等^[64]结合概率 $S-N$ 曲线、Miner 法则和概率密度转换技术,构建了一种概率损伤累积模型,并将其应用于疲劳可靠度评估和可靠性

表 1 应用随机过程研究结构疲劳损伤发展的工作

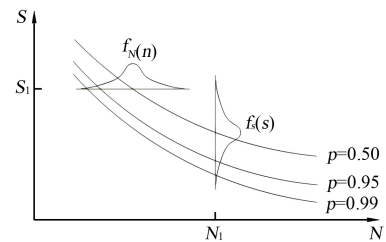
研究者	疲劳损伤发展过程描述	随机过程模型或方法
TANAKA 等 ^[49]	裂纹扩展过程	扩展马尔科夫过程近似方法
	混凝土的随机损伤演化过程	概率密度演化方法
GAO 等 ^[50] 、LI 等 ^[52]	疲劳损伤累积过程	将疲劳荷载模拟为复合泊松过程, 通过有限元数值模拟分析得到疲劳损伤累积随机过程
WILKIE 等 ^[52]	海上风力发电机组疲劳损伤的代理模型	高斯过程
KIM 等 ^[53-54]	船舶和海洋结构在宽带高斯/非高斯随机激励下的疲劳损伤	宽带高斯随机过程
HAO 等 ^[55]	疲劳裂纹扩展	一种扩展的反高斯过程
ZHANG 等 ^[56]	复合材料叶片在气动荷载下的疲劳失效	Gamma 过程
BENASCIUTTI 等 ^[57-58]	疲劳累积损伤过程	平稳宽带非高斯过程、双峰高斯过程
ZHANG 等 ^[59]	正交异性钢桥面疲劳裂纹扩展过程	复合泊松过程
顾怡等 ^[60]	疲劳累积损伤过程	任意时刻下的一维分布为近似对数正态分布的随机过程

优化设计。LIU 等^[65]采用随机 $S-N$ 曲线技术表征损伤累积过程中的不确定性, 进行变幅加载下的概率寿命预测。SUN 等^[66]基于 Miner 法则和 Monte Carlo 法, 提出了一种适用于恒幅和变幅荷载的统计疲劳损伤模型, 并能定量表征寿命与损伤的统计特性。QIAN 等^[67]通过实验或有限元模拟获取应力, 结合雨流计数法和 Miner 法则计算疲劳寿命, 利用 Kriging 模型和主动学习策略建立并更新可靠性模型, 有效提高计算效率并降低了实验与模拟成本。

此外, LI 等^[68]提出改进的向后统计推断方法 (ISIA), 有效提升小样本数据的疲劳寿命预测精度。LIU 等^[69]结合集成学习与数据增强技术, 开发出统一评估齿轮 $p-S-N$ 曲线和疲劳极限的方法, 显著减少样本量和实验时间。MARQUES 等^[70]基于最薄弱环节原理和高应力体积/表面积概念, 构建概率疲劳模型, 准确估算大尺度试样的 $p-S-N$ 曲线。PAN 等^[71]对带缺口试样, 采用改进的 Bootstrap 方法和疲劳寿命概率百分位一致性原理, 建立更精准的 $p-S-N$ 曲线并预测不同缺口几何形状的疲劳寿命。TAN 等^[72]提出改进的最大似然估计方法 (IMLM), 在小样本条件下拟合三参数 $p-S-N$ 曲线, 提高拟合精度并优化样本信息利用。

上述研究工作的疲劳可靠性分析方法, 随机疲劳失效模型为 $p-S-N$ 曲线 (图 1), 即随机形式的 Basquin 方程 $NS^m = C$ (N 、 S 为随机变量)。

$p-S-N$ 曲线是不同存活率 p (结构不发生疲劳破坏的概率) 的 $S-N$ 曲线集, 描绘了材料或结构的疲劳寿命、所受应力与失效概率之间的关系, $p-S-N$ 曲线包含了在给定应力幅 S 下疲劳寿命 N 的分布数据以及给定疲劳寿命 N 下应力幅 S 的分布数据两种信息。在进行结构疲劳可靠性分析时, 基于 Miner 准则或其改进形式, 用疲劳累积损伤指数度量损伤的程度, 并且已有研究一般均认为疲劳累积损伤指数服从对数正态分布或威布尔分布, 因而只要求其均值和方差, 确定其整个概率分布, 即可计算结构在不同存活率 p 下的疲劳寿命。

图 1 $p-S-N$ 曲线 - 随机疲劳失效模型

3 大跨度斜拉桥拉索疲劳可靠度评估

斜拉索作为大跨度斜拉桥的核心传力构件, 具有质量小、柔度大、低阻尼、高应力的特点。在运营期内, 大跨度斜拉桥拉索处于长期高应力水平叠加车辆与风荷载耦合作用, 诱发高周次应力交变形成渐进式损伤累积。当前斜拉桥拉索疲劳可靠性分析主要基于 Miner 准则计算疲劳累积

损伤,根据累积疲劳损伤指数概率分布计算疲劳可靠度。

殷志祥等^[73]通过苏通大桥案例验证拉索应力谱 Poisson 过程统计特性,融合 Miner 准则与随机车流荷载谱理论,建立了斜拉索疲劳可靠度评估模型。王涛等^[74]采用有限元模型模拟大跨度斜拉桥在风、列车动力作用下的振动响应,揭示了斜拉桥索-梁相关振动对拉索疲劳可靠性的影响。李岩等^[1]通过自编的风-车-桥动力响应分析程序,模拟随机车载与风载联合作用下的斜拉索应力谱,利用累积损伤理论与蒙特卡罗法分析拉索疲劳可靠性和寿命。朱金等^[75]计算了随机车流、风、浪荷载联合作用下的斜拉索应力谱,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。谭冬梅等^[76]以苏通大桥为例,研究了不同荷载工况对大跨度斜拉桥拉索疲劳可靠度的影响,结果表明单一疲劳车作用下的疲劳可靠度大于多车模型,而多车模型更符合实际。何旭辉等^[77]运用谐波合成法模拟斜拉桥脉动风场,进而计算典型拉索的抖振时程响应,并基于钢丝 $S-N$ 曲线及 Miner 准则估算了斜拉索的疲劳损伤。李春祥等^[78]针对斜拉索风致振动疲劳问题,假定任一应力循环周期内考察点的应力幅(最大与最小应力之差)服从瑞利分布,推导了疲劳可靠度计算公式并给出疲劳寿命计算方法。李岩等^[79]通过试验和工程实例分析,研究了腐蚀对斜拉桥拉索疲劳可靠性的影响,建立了考虑腐蚀的斜拉索疲劳抗力模型和可靠性分析方法。刘沐宇等^[80]通过构建钢绞线钢丝接触模型求解接触力,推导微动疲劳损伤随时间的演化表达式,建立钢绞线斜拉索抗力退化函数,最终构建了同时考虑腐蚀与微动疲劳的时变可靠性模型。XU 等^[81]基于腐蚀-应力-寿命($C-S-N$)模型,采用多参数 Weibull 分布,量化了不同腐蚀程度下钢丝的疲劳寿命,提出了考虑腐蚀变异性的平行钢丝斜拉索疲劳寿命预测模型。YU 等^[82]基于非线性 Lemaitre 疲劳损伤演化理论,建立了考虑应力范围和平均应力的钢丝疲劳概率模型,通过蒙特卡罗法模拟预测不同保证概率下斜拉桥索的疲劳寿命。FAN 等^[83]以南京大胜关长江大桥为例,建立车辆

参数概率模型,模拟随机交通荷载下的拉索响应,引入时变可靠性指数量化拉索性能退化,提出基于疲劳可靠性的斜拉桥索更换策略。DENG 等^[84]考虑了应力循环、应力重分布以及防护措施等时变因素,建立了从钢丝到拉索的跨尺度模型,提出了一种基于实测索力的斜拉索时变降解与维护策略分析框架。TEICHGRAEBER^[85]通过对两座桥梁的监测数据和数值模拟进行分析,提出了一种基于结构健康监测系统的斜拉桥索可靠性与耐久性评估算法。

4 结论与展望

国内外学者对结构疲劳可靠性分析理论及斜拉桥拉索服役疲劳可靠性问题进行了大量研究,取得了较多有价值的研究成果。但现有动力可靠性(含疲劳可靠性)分析理论及基于现有理论的大跨度斜拉桥拉索疲劳可靠性分析仍有一定局限性,亟待系统深入研究。

(1) 结构动力可靠度分析的基本问题“随机过程跨阈概率的精确解析分析”仍有待突破。由于随机过程的高维复杂概率分布、路径依赖性(或记忆性)、时间尺度等原因,随机过程跨阈概率分析只能采用数值方法或基于严苛数学假定的解析方法求解,因而存在计算量大或误差较大的缺陷。同时,随机过程多次跨阈问题研究极少,制约着结构疲劳可靠度的精确高效评估。有必要深入研究随机过程可实现解析计算的概率结构及相应的分析路径,突破随机过程跨阈衍生随机变量(首次跨阈时间、跨阈持时、跨阈次数等)概率分布的解析分析方法。

(2) 工程结构领域现有随机过程模型的适用性存在争议。迄今为止在工程结构领域里应用的随机过程模型都是多年前建立的,当前研究基本上直接套用已有的随机过程模型对结构效应过程进行模拟,在模型的构建过程中未考虑如结构应力随机循环变化等工程背景,对结构效应过程的时变概率机制也缺乏深入分析。有待开展由内在概率机制或概率结构驱动的随机过程建模研究,针对性地构建能够准确描述工程问题的随机过程模型。例如,基于实际工程背景,采用非平稳过

程随机过程建模;结合物理信息神经网络技术,构建机理驱动的状态转移模型。

(3) 当前(高周)疲劳累积损伤的疲劳可靠度分析方法存在一定局限。多数非线性疲劳累积损伤模型形式复杂、未知参数多,需要花费更多的试验进行参数确定。对于随机情形,荷载次序是不可预知的,因此在随机疲劳累积损伤与疲劳可靠性分析中非线性损伤累积模型仍难以应用。同时,现有随机累积损伤模型认为随机累积损伤仅取决于应力循环次数和应力峰值,而斜拉索长期处于高应力水平,应力跨阈持时对疲劳累积损伤的影响需要综合考虑。可进一步构建应力循环次数与跨阈持时双驱动的分阶段损伤模型,提高疲劳可靠性分析的精确度。

(4) 现有大跨度斜拉桥拉索疲劳可靠性评估模型较为粗略。斜拉桥长期服役下拉索的疲劳可靠性评估受结构动力可靠度基本理论的制约,疲劳可靠度分析模型是粗略的,难以满足保障斜拉桥长期服役安全可靠的设计与运维需求。融合随机过程跨阈解析理论,构建基于随机过程跨阈概率的精确解析分析方法,可实现对斜拉桥拉索长期服役下的疲劳可靠性高精度、高效评估,为斜拉索的设计与运营维护提供科学依据。

参考文献:

- [1] 李岩,吕大刚,盛洪飞.考虑随机车载-风载联合作用的斜拉桥拉索疲劳可靠性分析[J].中国公路学报,2012,25(2):60-66.
- [2] 朱位秋.非线性随机动力学与控制研究近期进展[J].强度与环境,2005(4):1-5.
- [3] COLEMAN J J. Reliability of aircraft structures in resisting chance failure[J]. Operations Research, 1959, 7(5):639-645.
- [4] CRANDALL S H. First-crossing probabilities of the linear oscillator[J]. Journal of Sound and Vibration, 1970,12(3):285-299.
- [5] LANGLEY R S. A first passage approximation for normal stationary random processes[J]. Journal of Sound and Vibration, 1988,122(2):261-275.
- [6] GHAZIZADEH S, BARBATO M, TUBALDI E. New analytical solution of the first-passage reliability problem for linear oscillators[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2012,138(6):695-706.
- [7] MADSEN P H, KRENK S. An integral equation method for the first-passage problem in random vibration[J]. Journal of Applied Mechanics, 1984,51(3):674-679.
- [8] ENGELUND S, RACKWITZ R, LANGE C. Approximations of first-passage times for differentiable processes based on higher-order threshold crossings[J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 1995,10(1):53-60.
- [9] AU S K, BECK J L. First excursion probabilities for linear systems by very efficient importance sampling[J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2001, 16(3):193-207.
- [10] DARLING D A, SIEGERT A J F. The first passage problem for a continuous markov process[J]. Annals of Mathematics Statistics, 1953,24(4):624-639.
- [11] ZHANG Z, LI W, YANG J. Analysis of stochastic process to model safety risk in construction industry[J]. Journal of Civil Engineering And Management, 2021,27(2):87-99.
- [12] RICCIARDI L M. On the transformation of diffusion processes into the wiener process[J]. Journal of Mathematical Analysis and Applications, 1976, 54(1):185-199.
- [13] ALILI L, PATIE P, PEDERSEN J L. Representations of the first hitting time density of an ornstein-uhlenbeck Process I[J]. Stochastic Models, 2005,21(4):967-980.
- [14] ZHANG Z, ZHOU M, FANG M. First-passage probability analysis of wiener process using different methods and its applications in the evaluation of structural durability degradation[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2021,25(10):1763-1781.
- [15] SACERDOTE L, TELVE O, ZUCCA C. Joint densities of first hitting times of a diffusion process through two time-dependent boundaries[J]. Advances in Applied Probability, 2014,46(1):186-202.
- [16] ZUCCA C, SACERDOTE L. On the inverse first-passage-time problem for a wiener process[J]. The Annals of Applied Probability, 2009,19(4).
- [17] ZHANG Z, LIU X, ZHANG Y, et al. Time interval of multiple crossings of the wiener process and a fixed threshold in engineering[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020,135:106389.
- [18] ZHANG Z, LIU Y, WANG L, et al. Probability analysis of duration of stochastic process exceeding fixed threshold and its application on structural cumulative damage and

- fatigue reliability evaluation[J]. ASCE – ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering, 2024, 10(2): 4024007.
- [19] MINER M A. Cumulative damage in fatigue[J]. Journal of Applied Mechanics, 1945, 12(3): A159 – A164.
- [20] BUCH A. Fatigue Strength Calculation[M]. Switzerland: Trans Tech Publications, 1988.
- [21] MANSON S S, Halford G R. Re-examination of cumulative fatigue damage analysis-an engineering perspective[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1986, 25(5–6): 539 – 571.
- [22] ZHU S P, HUANG H Z, WANG Z L. Fatigue life estimation considering damaging and strengthening of low amplitude loads under different load sequences using fuzzy sets approach[J]. International Journal of Damage Mechanics, 2011, 20(6): 876 – 899.
- [23] KWOFIE S, RAHBAR N. A fatigue driving stress approach to damage and life prediction under variable amplitude loading[J]. International Journal of Damage Mechanics, 2013, 22(3): 393 – 404.
- [24] EI AGHOURY I, GALAL K. A fatigue stress-life damage accumulation model for variable amplitude fatigue loading based on virtual target life[J]. Engineering Structures, 2013, 52: 621 – 628.
- [25] FREUDENTHAL A M, Heller R A. On stress interaction in fatigue and a cumulative damage rule[J]. Journal of the Aerospace Sciences, 1959, 26(7): 431 – 442.
- [26] ALTUS E. Fatigue, fractals, and a modified miner's rule[J]. Journal of Applied Mechanics, 1991, 58(1): 37 – 42.
- [27] KRAMERL R. A mechanism of fatigue failure[J]. Metallurgical transactions, 1974, 5(8): 1735 – 1742.
- [28] AHMADI A, ZENNER H. Lifetime simulation under multiaxial random loading with regard to the microcrack growth[J]. International Journal of Fatigue, 2006, 28(9): 954 – 962.
- [29] FATEMI A, YANG L. Cumulative fatigue damage and life prediction theories: A survey of the state of the art for homogeneous materials[J]. International Journal of Fatigue, 1998, 20(1): 9 – 34.
- [30] MARCO S M, STARKEY W L. A concept of fatigue damage[J]. Journal of Fluids Engineering, 1954, 76(4): 627 – 632.
- [31] GATTS R R. Cumulative fatigue damage with random loading[J]. Journal of Basic Engineering, 1962, 84(3): 403 – 408.
- [32] BUI-QUOC T. Cumulative damage with interaction effect due to fatigue under torsion loading: An analysis of the interaction effect on the basis of a continuous-damage concept is made using published test results obtained from two-step fatigue tests at room temperature[J]. Experimental Mechanics, 1982, 22(5): 180 – 187.
- [33] SUBRAMANYAN S. A cumulative damage rule based on the knee point of the $S - N$ curve[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 1976, 98(4): 316 – 321.
- [34] BEN-AMOUZ M. Prediction of fatigue crack initiation life from cumulative damage tests[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1992, 41(2): 247 – 249.
- [35] LEIPHOLZ H H E. On the modified $S - N$ curve for metal fatigue prediction and its experimental verification[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1986, 23(3): 495 – 505.
- [36] 胡明敏, 唐静静, 魏平. 一种 $S - N$ 曲线移动法的寿命分析模型[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2003(1): 60 – 63.
- [37] NIU X, LI G, LEE H. Hardening law and fatigue damage of a cyclic hardening metal[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1987, 26(2): 163 – 170.
- [38] LEIS B. A nonlinear history-dependent damage model for low cycle fatigue[M]. Low Cycle Fatigue. ASTM International 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428 – 2959, 1988: 143 – 159.
- [39] KUJAWSKI D, ELLYIN F. A cumulative damage theory for fatigue crack initiation and propagation[J]. International Journal of Fatigue, 1984, 6(2): 83 – 88.
- [40] GOLOS K, ELLYIN F. A total strain energy density theory for cumulative fatigue damage[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 1988, 110(1): 36 – 41.
- [41] KLIMAN V. Fatigue life prediction for a material under programmable loading using the cyclic stress-strain properties[J]. Materials Science and Engineering, 1984, 68(1): 1 – 10.
- [42] CHABOCHE J L, LESNE P M. A non-linear continuous fatigue damage model[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 1988, 11(1): 1 – 17.
- [43] DATTOMA V, GIANCANE S, NOBILE R, et al. Fatigue life prediction under variable loading based on a new non-linear continuum damage mechanics model[J]. International Journal of Fatigue, 2006, 28(2): 89 – 95.
- [44] DÖRING R, HOFFMEYER J, SEEGER T, et al. A plasticity

- model for calculating stress-strain sequences under multiaxial nonproportional cyclic loading[J]. *Computational Materials Science*, 2003, 28(3-4): 587-596.
- [45] CHAMAT A, ABBADI M, GILGERT J, et al. A new non-local criterion in high-cycle multiaxial fatigue for non-proportional loadings[J]. *International Journal of Fatigue*, 2007, 29(8): 1465-1474.
- [46] GARCIA S, AMROUCHE A, MESMACQUE G, et al. Fatigue damage accumulation of cold expanded hole in aluminum alloys subjected to block loading[J]. *International Journal of Fatigue*, 2005, 27(10-12): 1347-1353.
- [47] MESMACQUE G, GARCIA S, AMROUCHE A, et al. Sequential law in multiaxial fatigue, a new damage indicator[J]. *International Journal of Fatigue*, 2005, 27(4): 461-467.
- [48] DJEBLI A, AID A, BENDOUBA M, et al. A non-linear energy model of fatigue damage accumulation and its verification for Al-2024 aluminum alloy[J]. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 2013, 51: 145-151.
- [49] TANAKA H, TSURUI A. Reliability degradation of structural components in the process of fatigue crack propagation under stationary random loading[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1987, 27(5): 501-516.
- [50] GAO R, LI J, ANG A H S. Stochastic analysis of fatigue of concrete bridges[J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2019, 15(7): 925-939.
- [51] LI J, GAO R. Fatigue reliability analysis of concrete structures based on physical synthesis method[J]. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 2019, 56: 14-26.
- [52] WILKIE D, GALASSO C. Gaussian process regression for fatigue reliability analysis of offshore wind turbines[J]. *Structural Safety*, 2021, 88: 102020.
- [53] KIM H JIN, JANG B S, Kim J D. Fatigue-damage prediction for ship and offshore structures under wide-banded non-gaussian random loadings part I: Approximation of cycle distribution in wide-banded gaussian random processes[J]. *Applied Ocean Research*, 2020, 101: 102294.
- [54] KIM H JIN, JANG B S. Fatigue life prediction of ship and offshore structures under wide-banded non-gaussian random loadings[J]. *Applied Ocean Research*, 2021, 106: 102480.
- [55] HAO S, YANG J, Berenguer C. Degradation analysis based on an extended inverse gaussian process model with skew-normal random effects and measurement errors[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2019, 189: 261-270.
- [56] ZHANG C, TEE K F. Application of gamma process and maintenance cost for fatigue damage of wind turbine blade[J]. *Energy Procedia*, 2019, 158: 3729-3734.
- [57] BENASCIUTTI D, TOVO R. Cycle distribution and fatigue damage assessment in broad-band non-gaussian random processes[J]. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 2005, 20(2): 115-127.
- [58] BENASCIUTTI D, Tovo R. On fatigue damage assessment in bimodal random processes[J]. *International Journal of Fatigue*, 2007, 29(2): 232-244.
- [59] ZHANG H, LIU Y, DENG Y. Fatigue crack assessment for orthotropic steel deck based on compound poisson process[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2020, 25(8): 04020057.
- [60] 顾怡, 吕海波. 结构元件疲劳可靠性分析的累积损伤模型[J]. *机械强度*, 2000(3): 228-230.
- [61] GAO K, LIU G. Novel nonlinear time-varying fatigue reliability analysis based on the probability density evolution method[J]. *International Journal of Fatigue*, 2021, 149: 106257.
- [62] TRIDELLO A, BOURSIER N C, ROSSETTO M, et al. Statistical models for estimating the fatigue life, the stress-life relation, and the $P-S-N$ curves of metallic materials in very high cycle fatigue: a review[J]. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 2022, 45(2): 332-370.
- [63] 倪侃, 张圣坤. 疲劳可靠性二维统计 Miner 准则[J]. *机械工程学报*, 2002(7): 65-69.
- [64] RATHOD V, YADAV O P, RATHORE A, et al. Reliability-based design optimization considering probabilistic degradation behavior[J]. *Quality and Reliability Engineering International*, 2012, 28(8): 911-923.
- [65] LIU Y, MAHADEVAN S. Efficient methods for time-dependent fatigue reliability analysis[J]. *AIAA Journal*, 2009, 47(3): 494-504.
- [66] SUN Q, DUI H N, FAN X L. A statistically consistent fatigue damage model based on miner's rule[J]. *International Journal of Fatigue*, 2014, 69: 16-21.
- [67] QIAN H M, WEI J, Huang H Z. Structural fatigue reliability analysis based on active learning kriging model[J]. *International Journal of Fatigue*, 2023, 172:

- 107639.
- [68] LI C, WU S, ZHANG J, et al. Determination of the fatigue $P-S-N$ curves-a critical review and improved backward statistical inference method[J]. International Journal of Fatigue, 2020, 139:105789.
- [69] LIU H, LI Y, LU Z, et al. A unified estimation method for gear fatigue $P-S-N$ curves and fatigue limits based on ensemble learning and data augmentation[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2024, 298:109941.
- [70] MARQUES J M E, M ŽOUREK M, PAPUGA J, et al. A probabilistic stress-life model supported by weakest link principle and highly-stressed volume/surface area concepts [J]. International Journal of Fatigue, 2024, 178:108006.
- [71] PAN X, LIU J, LI Y, et al. A study on modified $P-S-N$ curve of notched specimens based on small sample under multiaxial loading[J]. Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, 2022, 45(12):3577-3591.
- [72] TAN X, LI Q, WANG G, et al. Three-parameter $P-S-N$ curve fitting based on improved maximum likelihood estimation method[J]. Processes, 2023, 11(2):634.
- [73] 殷志祥, 高哲, 冯瑶. 车辆荷载作用下斜拉索疲劳可靠度分析[J]. 工业建筑, 2017, 47(6):163-167.
- [74] 王涛, 刘德贵, 张兴标. 风、列车作用下斜拉桥索-梁相关振动对拉索疲劳可靠性的影响[J]. 振动与冲击, 2021, 40(7):154-163, 230.
- [75] 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.
- [76] 谭冬梅, 陈杰, 瞿伟廉. 用于大跨斜拉桥拉索疲劳可靠度分析荷载的研究[J]. 武汉理工大学学报, 2015, 37(6):54-59.
- [77] 何旭辉, 程浩, 李光强. 大跨度钢桁梁斜拉桥拉索抖振疲劳损伤分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2013, 32(S1):752-755.
- [78] 李春祥, 李薇薇. 斜拉索风致振动疲劳的分析[J]. 振动与冲击, 2009, 28(9):135-138, 162, 219.
- [79] 李岩, 杨婷婷, 夏梁钟. 腐蚀对风车联合作用下斜拉桥拉索疲劳可靠性的影响分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2020, 47(5):107-115.
- [80] 刘沐宇, 陈齐凤, 吴志强. 考虑微动疲劳的斜拉桥钢绞线斜拉索时变可靠性分析[J]. 土木工程学报, 2012, 45(7):141-147.
- [81] XU H, BAI N, LAN C, et al. Predictive model for fatigue life in parallel-wire stay cables considering corrosion variability[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2023, 19(7):964-977.
- [82] YU S, YAN C, LIU C, et al. Fatigue life evaluation of parallel steel-wire cables under the combined actions of corrosion and traffic load[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2023, 2023:1-25.
- [83] FAN Z, YE Q, XU X, et al. Fatigue reliability-based replacement strategy for bridge stay cables: A case study in China[J]. Structures, 2022, 39:1176-1188.
- [84] DENG C, REN Y, XU X, et al. Real cable force based time-varying degradation and maintenance strategy analysis of stay cables[J]. Engineering Structures, 2025, 328:119730.
- [85] TEICHGRAEBER M. Reliability and durability assessment of bridge stay cables[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2024, 25(1):29.