

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.221



桥梁施工风险评估 2020 年度研究进展

施洲,余万庆,周勇聪,纪锋,张育智

(西南交通大学 土木工程学院,成都 610031)

摘要:为了解桥梁施工风险评估研究的具体内容及过去一年的发展动态,并在总结其研究内容、方法和成果的基础上更好地开展后续研究,从桥梁施工风险识别、风险概率与损失估计、风险评价与控制、动态风险评估方面着手,查阅了近期文献,并进行了分类、总结和评述。研究表明:复合风险识别方法、风险识别数据库系统及可视化不断发展;基于监测数据定量概率校正及社会损失模型构建是风险概率和损失估计的新发展;风险评价的新进展则基于聚类或数据场的风险评价新方法及模型准确度的提升;风险链式传递模型的精细化修正、基于监测数据的动态评估模型是动态风险评估的新方向。最后,对现有研究的不足和有待深化的问题提出建议,为该方向的进一步发展提供参考。

关键词:桥梁施工; 风险识别; 风险评估; 动态评估; 研究进展

中图分类号:U446 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2022)01-0198-08

State-of-the-art review of risk assessment on bridges construction in 2020

SHI Zhou, YU Wanqing, ZHOU Yongcong, JI Feng, ZHANG Yuzhi

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

Abstract: To understand the specific contents of bridge construction risk assessment and the development trend in the past year, and to carry out the better follow-up research on the basis of summarizing the research content, methods and achievements, the recent literatures were consulted, classified, summarized and commented from four aspects of the bridge construction risk identification, risk probability and loss estimation, risk assessment and control, dynamic risk assessment. The results show that the composite risk identification method, risk identification database system and visualization were developing continuously. The quantitative probability correction based on monitoring data and the construction of social loss model were the new development of risk probability and loss estimation. The new development of risk assessment was based on clustering or data field risk assessment method and the improvement of model accuracy. The fine modification of risk chain transferring model and dynamic evaluation model based on monitoring data were the new directions of dynamic risk assessment. Finally, some suggestions were put forward for the shortcomings of the existing research and the further development of this direction, which can be references for the work to be done in the future.

Keywords: bridge construction; risk identification; risk assessment; dynamic assessment; research advances

桥梁施工过程中存在众多的不确定因素,如材料性能差异、人为失误、机具故障及环境变化等,这些不确定因素使得桥梁的施工、运营过程都不可避免面临着各种风险,其中施工期间的风险尤为突出。因此,为降低桥梁施工的风险,避

免人员伤亡并降低经济损失,需开展科学合理的桥梁施工风险评估研究。

工程领域中的风险评估应用始于 20 世纪 70 年代的核工业,风险评估系统地应用于桥梁等土木工程重大问题决策则

收稿日期:2021-07-06

基金项目:中国铁路总公司科技研究开发计划重大课题(2017G006-A)

作者简介:施洲(1979-),男,副教授,博士生导师,主要从事桥梁结构试验及运营性能评定研究,E-mail:zshi1979@swjtu.edu.cn。

是在 1983 年在丹麦哥本哈根举办世界首次风险评估学术会议之后^[1]。风险理论最开始是在船舶撞击桥梁的问题上予以应用^[2],随着桥梁建设的蓬勃发展,人们对桥梁建设期间风险的认识逐渐深入,如 Skorupka^[3]对波兰境内桥梁施工进行了风险识别和量化研究;Decò 等^[4]构建了公路桥梁在多种危险情况下的定量风险评估框架。中国工程领域风险研究起步于 20 世纪 80 年代,项目风险管理思想被引进到中国,开始应用到大型工程项目建设领域,但针对桥梁工程风险研究则从 2001 年的马耳他会议后开始^[5]。2002 年,同济大学等单位受委托为上海崇明跨江桥梁工程做了全面的安全评估,这是国内首次对施工阶段和运营期桥梁进行系统的安全风险评估^[6]。之后随着我国大规模基础设施建设,桥梁施工风险评估理论的迅猛发展。阮欣^[1]对桥梁风险概率、风险损失、风险等级评估和风险控制开展了详细的研究;之后各位学者,如王诗青^[7]结合实际公路桥梁风险评估的经验,阐述了公路桥梁风险评估的具体流程;谢功元^[8]对山区桥梁的施工风险进行了多因素评估,进一步推动施工风险评估的发展。在工程实际应用方面,交通运输部制定《公路桥梁和隧道工程施工安全风险评估指南(试行)》(2011),北京市推广《城市轨道交通土建工程设计安全风险评估规范》(2014),原铁道部颁发《铁路建设工程安全风险管理暂行办法》(2010),均对实际工程中风险识别、评估及控制对策提出要求及指导,相关规范有力推动了桥梁施工风险评估的发展。初步形成程序化的风险评估过程:识别桥梁施工过程中潜在的各种风险;然后分析风险发生的概率、风险可能造成的损失后果,并建立风险评价体系;综合风险概率和损失评估出风险等级;最后提出风险控制对策和措施,其基本流程如图 1 所示。

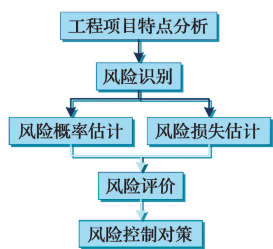


图 1 风险评估的基本流程

但随着大跨度、复杂新结构、新材料、新工艺桥梁的不断兴建,为应对施工中风险源数量多、隐蔽性强等问题,现有桥梁施工风险评估理论与方法需要进一步深化研究,且对于桥梁施工动态风险评估仍有待发展。在此,根据现有研究成果,结合桥梁工程风险评估主要流程,对风险识别、风险概率和损失估计、风险评价方法与控制对策研究、动态风险评估研究 4 部分进行总结归纳,并依据 2020 年度进展情况,对未来的研究提出研究展望。

1 桥梁施工风险识别研究

1.1 桥梁施工风险识别概述

风险识别是桥梁施工风险评估的基础,常用的风险识别

方法主要分为定性和定量两种类型。定性识别方法主要是依靠分析人员及行业专家的专业判断力并结合工程经验进行风险识别的一类方法,其中最为常见的专家调查法^[9-10]、WBS-RBS(工作分解-风险分解)法^[11]、检查表法^[12]、故障树分析^[13]、文献调查^[14]、事件树分析^[14]等。专家调查法实施时多以头脑风暴法和德尔菲法等形式进行,如于云智^[9]使用头脑风暴法,得到潍坊白浪河大桥施工面临的 29 个风险因素,刘长波^[10]采用德尔菲法对重庆东水门长江大桥进行了风险识别;辛望等^[11]运用 WBS-RBS 法对整个桥梁施工过程进行了风险识别;Sathanathan 等^[12]通过检查表的方式识别出桥梁施工中的关键风险因素。此外,故障树分析法、事件树等运用也较为广泛,通过分析工程项目之间的逻辑关系实现风险识别;Davis-McDaniel 等^[13]采用故障树理论分析了南卡罗来纳州的某梁桥桥梁失效原因;Salim 等^[14]通过借鉴现有管理机制和文献综述,利用事件树方法识别桥梁病害的风险因素。

定量的风险识别方法,即事故统计法,采用相关事故案例统计的方式识别风险。该方法以客观、科学、可靠,但在实施时,一般风险因素难以全面统计,且一些重要风险因素往往因为样本数量少而难以统计,尤其是采用新结构桥梁会存在尚未经历且难以预测的风险,其适用性有限。

总结各种风险识别方法的优缺点及适用范围如表 1 所示,尚无适合于所有工程的单一风险识别方法。对于普通结构桥梁,单一的风险识别方法基本能实现施工风险准确识别;而对于复杂结构桥梁,需要同时兼顾风险识别全面性和特殊性的要求,通常是综合运用多种方法才能实现更为准确识别风险的目的。

表 1 常见风险识别方法

常用方法	识别依据	适用性	局限性
专家调查	专业人员的丰富经验	对不同主体风险全面识别	受主观性干扰较大
WBS-RBS	详细的工程施工资料	程序化、全面识别	未发生风险无法识别
定性识别	检查表	工程实际情况可预测	风险受工程现场干扰大
文献调查	相似风险源系统资料	已发生同类风险识别	未发生风险无法识别
故障树分析	原因事件分析	单一风险事件的具体识别	识别工作量大
事件树分析	事故后果分析	单一风险事件的具体识别	识别工作量大
定量识别	事故统计	大量数据统计	已发生同类风险识别
			未发生风险无法识别

1.2 桥梁施工风险识别研究进展

在风险识别领域,单一的识别方法在普通结构桥梁中运用日益成熟,如刘佳^[15]以德阳至都江堰高速公路中桥梁工程为例,通过事件树分析法,对可能发生的各种事件的风险因

素进行了详细识别。针对复杂结构,林孔钊等^[16]对泉州湾跨海大桥主桥工程,按照施工阶段划分,通过专家评估与工程类比结合的识别方法,系统调查各个阶段风险事态;针对复杂结构的桥梁风险识别,施洲等^[17]采用 WBS-RBS 结合专家调查法的复合识别方法,对五峰山长江特大桥开展施工风险识别研究,识别出 610 项风险源,以满足跨江跨海大桥的工程需要。针对一般结构桥梁风险识别,覃勇^[18]引入 AI 架构的基本理论,通过确定风险识别因子和系统整体框架、部署 AI 应用层架构、开发 AI 应用软件等,建立了基于 AI 架构的桥梁施工风险识别系统。Kim 等^[19]基于 BIM 技术对建筑工地常见的工人跌倒安全风险,进行 3D 立体化展示,极大提高了工程现场风险管控水平。经文献调研分析,桥梁施工风险识别 2020 年的主要进展体现在:

1) 复合风险识别方法。对于复杂的大型桥梁,以专家评估结合工程类比、WBS-RBS 结合专家调查法的为代表的复合识别方法能够满足工程需要。

2) 风险识别数据库系统及可视化。在一般结构桥梁,研究转向对现有研究成果总结归纳,结合人工智能技术对已有风险源编码入库,正构建并逐步完善风险源数据库系统,并对典型风险进行可视化展示。

2 桥梁施工风险概率与损失估计

2.1 桥梁施工风险概率和损失估计概述

2.1.1 桥梁施工风险概率估计 在风险识别的基础上,可进一步开展风险的概率估计。风险概率估计分为主观和客观两种方法。主观概率以贝叶斯理论为代表,认为一个事件的概率是人们根据经验对该事件发生的可能性所给出的个人主观判断。客观概率也称为古典概率,认为通过大量试验数据得到数值即为准确的概率值^[20]。而在实际工程中,风险事件样本量少,通常难以直接通过数据统计方式获得客观概率。在既有研究成果中,根据概率估算准确程度,又可分为定性、定量及两者相结合的概率估计 3 类。

1) 定性概率估计。该类方法以专家打分法为代表,如将风险按发生概率大小分为 5 级,分别对应“可能性很大”、“比较大”、“中等”、“小”、“极小”,依据专家评判结果,综合考虑给出评定风险事件的概率等级。但定性概率等级相对于具体的概率数值,在评估决策时不利直观判断。该方法常用于基于最低合理可行(As Low As Reasonably Practicable, ALARP)准则的风险矩阵法^[21]中,如陈小波等^[21]采用决策论的理论和方法,结合风险矩阵和 ALARP 准则,对某大桥悬臂施工风险进行了研究。

2) 定性和定量综合概率估计。此类方法将定性的专家打分结果转化为具体数值,极大拓展了定性估计方法应用范围。为改进定性估计中专家判断存在个人经验不足、主观性强等缺陷,周健等^[22]采用对不同专家赋予不同权重值的方法修正了风险概率值。也有研究者进一步细化定性的风险等级描述来提升概率估计值的精度,如施洲等^[17]根据概率等级

描述及其所对应中心值计算了风险事件概率。此外,王龙源^[23]利用模糊数学方法解决专家判断主观性问题,结合宁波北跨线桥工程,验证了该方法的可靠性。针对单一风险事件,也有研究者采用贝叶斯网络^[24]和故障树^[25]等方法,通过发掘风险事件之间的逻辑关系,利用贝叶斯网和故障树在不确定性知识的概率表达能力,计算目标事件风险发生概率值。

3) 定量概率估计法。尽管上述方法具有简便、高效等特点,但其局限性在于受人为因素影响显著,从本质上看无论是权重修正还是模糊数学理论,并没有从根本上消除主观性,所以更多学者引入基于可靠度理论的定量计算方法,通过构建失效状态的极限状态方程方法求解结构失效概率值,如 Ng 等^[26]采用蒙塔卡罗模拟法利用可靠度函数计算了拱桥建设失效概率;定量估计方法由于引入更精确但相对复杂的理论模型,使得概率模型本身的准确程度得以提高。但相对定性方法,其应用复杂,且局限于结构失效风险,尤其在面对复杂结构桥梁时,功能函数变量较多,概率计算准确度会受到干扰,需要进一步深化分析。

总结可知,单纯的定性方法因适用性低、精密度不足等原因已经较少采用,应用最为广泛的是定性与定量综合的方法。但受专家主观性影响,其概率精度相对于定量方法较低,但具有简便高效,应用范围广的优点,实际使用时需要综合桥梁具体特点合理选择方法。

2.1.2 桥梁施工风险损失估计 桥梁施工风险损失是指风险事件发生之后产生的不利影响,风险损失划分中目前应用最为普遍的是《公路桥梁和隧道工程施工安全风险评估指南》^[27]中的类别划分,指南中将风险损失划分为人员伤亡、经济损失和环境影响三种基本类别。其中,人员伤亡是指在桥梁施工安全事故中的人员伤亡数目。经济损失是指风险事故发生后产生的直接和间接费用的总和,直接费用通常具有具体物理形式的损失,如施工设备损毁、结构损伤等;间接费用通常体现为时间的损失,即为工期的延误损失。环境影响是指项目施工对周围建筑物破坏或损坏、环境污染损失等。此外,上述损失发生时会造成次生影响,如随着事故损伤以及人员伤亡的增大,民众的公共安全感和行业公信力等也会成一定比例的随着下降,由此造成的损失也称为社会损失^[28]。桥梁施工风险损失估计与概率估计方法同样分为定性和定量估计两类。

1) 定性风险损失估计。以专家打分法为主,各风险损失等级由风险事件发生后所造成影响程度确定,可划分为轻微、较大、严重、很严重、灾难性五个等级,汇总专家结果得到风险损失等级,由于后续评估中,需要综合三类风险损失等级,目前多采用平均值或模糊数学中最大隶属度原则求解,实施时简便快捷,但无法彻底消除专家个人主观性过强的问题。

2) 定量风险损失估计。此类方法则是根据数学模型对各风险损失分别量化计算,但风险损失后果不一,通常的做

法是将各损失量化为货币损失^[29]。如王玉倩等^[30]采用基于生命质量指数 LQI(Life Quality Index)的模型,将人的剩余生命价值量化为货币值,从而评估人员伤亡损失;束景晓等^[28]针对施工中设备、延误、环境破坏等损失,从设备修复和采购、工期延误、环境修复费用等角度进行了货币量化。

结合已有研究成果可见,定性的风险损失估计涉及风险评价过程,因此应用较为广泛,多用于事前风险评估研究;定量估计方法量化虽精确,但社会损失涉及人的主观因素,在具体量化时仍存在一定局限性;且定量估计针对具体风险事件,当风险事件较多时,会造成工作量过大、重点不突出等问题,建议对主要风险事件且有条件时进行定量估计。

2.2 桥梁风险概率和损失估计研究进展

在风险概率估计方面。定性定量结合的专家打分法因为简便高效、适用性强等优点,仍是目前主要的方法,如刘琴^[31]采用专家打分法对桥梁的风险等级进行分类;施洲等^[32]运用专家打分法对五峰山大桥沉井施工风险发生概率和损失等级进行评定。定量概率估计方法则不再局限于基于蒙特卡洛法的采样模拟,刘萌^[33]将 JC(一阶二次矩)法与统计反演理论相结合,通过将实时监测数据输入极限状态方程中,根据风险因素的先验分布实现了风险事件概率的动态更新,通过将后验概率分布与先验概率分布进行对比,实现了风险概率的校正,提高了模型计算准确度,并以某跨高铁分离式立交桥顶推施工为实例,进行了方法的可靠性验证。

在风险损失估计方面,韦家钧^[34]采用定性的调查打分获取了贵港平南三桥工程施工风险因素损失值,Argyroudis 等^[35]定量分析桥梁在地震作用下由于结构损坏而造成的直接经济损失和由于交通中断而造成的间接经济损失。

2020 年度进展调研表明,在缺少样本数据的支持下,基于专家调查打分法的概率和损失估计方式仍是目前应用较多的方法,本年度的研究进展集中在定量的概率和损失估计方面:

- 1)基于监测数据定量概率校正、定量概率估计领域,不再局限于以往模拟分析,而是将施工中监测数据与估计模型函数相结合,减小风险因素的变异系数,提高概率计算精度。
- 2)社会损失模型构建、风险损失定量估计方面,继续对量化模型展开修正研究,提高计算准确度,尤其是对难以量化的社会损失展开了深入研究。

3 桥梁施工风险评价与控制研究

3.1 桥梁施工风险评价与控制对策概述

3.1.1 桥梁施工风险评价 桥梁施工风险评价是在风险概率、风险损失估计的基础上,通过特定的风险评价指标体系来确定风险的等级,表征风险的严重程度并为风险预警、控制对策提供参考。为进一步量化风险评价,通常将风险概率、风险损失估计结果按照特定数学模型计算出对应的风险指标值。风险评价模型关键在于风险指标值计算和风险评价指标体系的构建。

风险评价指标体系,是指根据法律及行业安全规定的原则和要求制定的,旨在反映被评价对象的风险水平,后果严重程度等描述特征的所有标准、指标或准则的统称^[36];由于风险评估过程是一个系统性、连贯性的工作,评价指标体系应在风险评价时预先构建。因此风险评价时,首要任务即根据风险指标值结果构建相应的评价指标体系,即确定风险接受准则、风险评价标准等风险评价指标,再选取合适的评价方法,从而获得风险评价结果。具体的风险评价流程如图 2 所示。

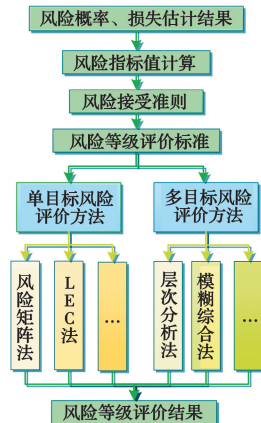


图 2 风险评价研究流程

1)风险指标值计算。主要分为两类,一是以具体概率数值,仅从风险事件发生等级评估,如故障树和贝叶斯方法中常用该准则;二是从概率与损失综合的角度,一般将环境、经济和人员损失等级值综合量化并与风险概率值相乘,从而获得综合的风险指标值,如施洲等^[17]在五峰山大桥沉井基础施工风险评估中,将风险项的发生量化概率值与风险损失值二者乘积作为对应风险项的初始风险值。

2)风险接受准则。常见的有最低合理可行(As Low As Reasonably Practicable, ALARP)准则、平均死亡风险(Average Fatality Risk, AFR)、聚合指数(Aggregated Indicator, AI)、频率与死亡人数(Frequency Vs Number of Fatalities, FN)曲线等原则^[36],其中最为常用的 ALARP 准则如图 3 所示。当风险处于不可接受区域时,必须对风险源采取强制控制措施;风险在可忽略区域时,风险水平相对较低,可不需要采取控制对策;风险在最低合理可行区(ALARP 区)时,则需要根据工程实际情况制定最为经济合理的控制对策,降低风险,直至其落入可忽略区域。

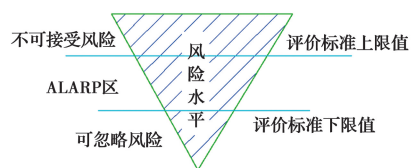


图 3 ALARP 准则风险评价标准分级

3)风险等级评价标准。最为常见的是基于 ALARP 准则的四级标准,具体表现为 I 级(低度)、II 级(中度)、III(高度)、

IV(极高),分别对应“可以接受”、“有条件接受”、“有条件接受”、“不可接受”四级准则;另外,针对具体的概率和损失划分标准,大规模应用的有国际隧道协会在 *Guidelines for Tunneling Risk Management* 7.3.1 条中推荐的风险发生概率等级标准,以及《公路桥梁和隧道工程施工安全风险评估指南》中对人员伤亡、经济损失和环境影响的损失等级划分标准。此外,还有一种评价标准划分,采用排序的方法,结合风险源数目及均分原则,划分为四级风险。有文献进一步将 I 级和部分 II 级风险划为一般风险源,将涉及结构关键部位的 II 级和全部的 III、V 风险划为重大风险源^[17]。一般风险源,主要指施工中相关人员、机具、物料的常规风险。重大风险源,指风险影响因素关联性高、发生后产生的损失大、涉及结构关键部位的风险源。

4) 风险评价方法。工程领域最为广泛采用的是风险矩阵法,该方法简便而精确,适用性强,有效将多种风险统一表示,如谢海涛^[37]通过风险矩阵法对单个风险因素进行评估,分析了风险因素对工程的影响,得出了相应风险的接受条件和对策。常用的还有 LEC 评估法^[38](L 表示事故发生的可能性,E 表示人员暴露于危险环境中的频繁程度,C 表示事故发生导致的后果),主要应用于安全风险评估。但风险矩阵法和 LEC 法尚未考虑各单个风险共同作用及综合后果,所以也需要对风险进行多目标评价,其中常用的百层次分析法、故障树法、贝叶斯网络、模糊综合评价法等。

多目标风险评价方法中,陈国华等^[39]以港珠澳跨海桥梁工程为实例,采用层次分析法计算风险度来确定作业单元的整体风险等级;刘沐宇等^[40]运用风险模糊故障树评价方法,从整体层面计算出武汉鹦鹉洲长江大桥双壁钢围堰水中墩墩施工中风险发生概率;赵延龙^[41]应用贝叶斯定理建立大跨度斜拉桥施工安全风险评估模型,得到了结构失稳风险概率值及风险等级;刘英富^[42]针对禹门口黄河大桥,采用模糊综合评价方法对桥梁钻孔桩施工阶段的风险进行了研究。此外,在基于可靠度定量概率估计基础上,也多采用神经网络(BP)综合各构件失效概率以评价整体风险,如刘文荣等^[43]针对龙城大桥,基于 BP 网络的失效概率法,考虑主要风险因素,建立了主要风险因素的结构极限状态方程,得到各个施工阶段的失效概率,确定结构的目标可靠度。

综上所述,风险评价方法已形成基本的方法流程,部分评价方法受定性概率和损失估计影响,评价时会面临客观的统计资料偏少,人为主观性影响;且在多目标风险评价时,尤其是特殊结构中层次复杂、单层因素数目众多,会面临指标冗余、计算量过大的问题。

3.1.2 桥梁施工风险控制对策 风险对策制定时,根据风险评价等级结果分别制定。针对一般风险源,控制措施主要是依据相关技术标准、安全管理与教育要求并结合现场实际制定,同时针对常见风险制定安全措施、风险预案等。针对重大风险源,其控制措施主要涵盖:各分部工程专项施工技术方案研究及调整、各分部工程结构的施工监测及控制、施

工中动态的技术分析总结、风险制度管理等,具体研究如下:

1) 施工专项技术方案。多以构建力学分析模型的形式进行,如曹茹接^[44]运用有限差分法对,利用有限差分法原理对沉井的施工过程受力风险进行动态模拟,并对不同控制措施的防护效果进行评估,确保沉井下沉顺利就位。

2) 施工监测方案控制。赵有明等^[45]对依据规范并结合以往的施工经验,提出南京长江第四大桥北锚碇沉井几何姿态监控标准,确保施工安全顺利进行;门广鑫^[46]对斜拉桥、悬索桥、系杆拱桥等特殊结构桥梁施工中,对监控内容、测试方法及控制标准等提出具体的要求。

3) 施工中动态的技术分析总结。张骏等^[47]基于“一图四表法”的理念与流程与信息技术相融合,提出了构建质量风险管理信息系统的解决方案,并论述了信息系统主要数据源的数据标准,构建了质量风险动态跟踪模型、质量风险预警模型与质量风险公示图自动生成模型,实现施工中动态的技术分析总结。

目前,风险控制对策主要存在于现场管理及技术控制两个方面,与风险识别、评价的紧密结合情况还有待于进一步加强。

3.2 桥梁施工风险评价及控制对策研究进展

在风险评价领域,既有方法的科学性和适用性在工程应用中得到进一步验证,如徐佳昕等^[48]采用层次分析法,将导致桥梁施工风险事故的原因进行分层,对可能导致桥梁施工安全事故的风险因素进行了多层次评价;刘小燕等^[49]采用模糊层次分析法,以潭江特大桥为背景,结合其挂篮悬臂施工工艺及施工现场组织管理情况,对挂篮悬臂施工过程中影响桥梁施工质量与人员安全风险等级进行评定;此外,在五峰山长江特大桥开展施工风险评估中,施洲等^[17]采用改进的风险矩阵法对风险源等级进行评定,共评出中度及以上等级风险 82 项,其中 17 项为重大风险源;汤天明等^[50]根据施工组织设计分解施工作业区和施工工序,通过 LEC 法及指标体系法对武汉青山长江公路大桥施工阶段安全进行专项风险分析和评估,结果表明,全桥整体安全风险等级为 IV 级;跨乙烯管廊桥区、主航道桥区、跨汉施公路、跨新港铁路 4 个施工区域安全风险等级为极高等级。

多目标风险评价方法在结构特殊桥梁的运用中,会面临指标数量多,层次结构复杂,计算量大且精度易受到干扰的问题。针对该问题,年度研究中取得较大进展。史洪春^[51]在理论分析的基础上,建立了层次分析法、加速遗传算法和模糊数学相结合的风险等级评估模型,计算时简化权重计算流程,提升效率,并成功用于高速公路桥梁在建设过程中的风险评估,评定出全桥施工过程中风险等级为 I 级;雷佳^[52]利用模糊层次分析法对中开高速银洲湖大桥施工中风险进行了评价,一定程度上减少人的主观因素的影响,确定该桥桩基施工中,清孔工作、吊装过程和灌注水下混凝土工序施工中风险等级较高;杨隆浩等^[53]在现有基于扩展置信规则库的桥梁风险评估模型的基础上,通过引入参数优化和数据包络

分析理论,分别提出了扩展置信规则库的规则生成方法和规则约减方法,确保评价所需的扩展置信规则库具有最优的参数取值和参数数量,精简评价模型的同时,提升风险评价结果计算效率和准确度。

此外,在其他工程领域中,张欢等^[54]提出了一种基于数据场聚类的隧道施工风险评估模型,在采用模糊数学对专家评语量化后,借助基于数据场的高斯混合模型,通过聚类分析确定成功确定拉林铁路隧道工程各风险因素等级,为桥梁风险评价模型提供一种新的研究思路。

在风险控制对策方面,根据风险源等级划分,对一般风险源主要是依据相关规范标准、安全管理要求并根据现场实际制定,重大风险源的控制对策应制定专项预案,其控制措施主要包括:专项施工技术方案研究、专项施工监测控制措施、风险制度管理等。为控制施工中具体风险事件,戴良军等^[55]根据某长江大桥索塔基础工程施工特点,基于钢围堰的施工工艺建立力学模型计算公式,构建了综合考虑抗滑安全系数及风险后果影响的钢围堰整体抗滑模型,从而控制钢围堰整体滑移风险。

综合风险评价方法和风险控制对策创新研究,并结合其他工程领域可作为借鉴的成果,本年度所取得进展总结如下:

1)减少不显著指标干扰,提升风险评价模型的准确度,现有评估模型精确性得到提升,如在复杂结构桥梁中,风险指标数量过多,通过扩展置信规则库排除不显著指标干扰,最大限度提高评价结果准确度。

2)基于聚类的新的风险评价方法,基于数据场的高斯混合模型聚类模型的应用,提供了一种通过聚类中心确定风险等级的风险评价方法的新思路。

3)风险控制对策研究,以科学决策、优化决策、降低成本的基本原则,学者正充分总结归纳研究成果,形成制度化的风险控制体系。

4 桥梁施工风险动态评估研究

4.1 桥梁施工风险动态评估概述

实际桥梁施工中,尤其是结构愈加新颖和复杂的大型桥梁工程中,风险因素是相互影响的,在大跨径或复杂结构桥梁工程中,风险事件发生往往是一系列相继触发的连锁传递过程,使桥梁施工风险呈现出随时间推移的动态传递特征,在其他工程领域中,李存斌等^[56]提出了风险元传递理论,Jha^[57]应用了动态贝叶斯网预测关键交通基础设施发生恐怖袭击的可能性,为桥梁施工过程中动态传递提供了理论参考。

文献调查表明,当前也有一些研究者开展了桥梁施工动态风险的相关研究,康俊涛等^[58]提出了一种基于贝叶斯网络理论的施工安全性评价方法,成功应用于武汉某斜拉桥上部结构施工,通过形成事故链详细分析风险因素向风险事件传递网络,从中成功评估出安全风险的传递主路径。贾布裕

等^[59]采用离散动态贝叶斯网络理论建立桥梁各个构件的状态评估模型,并根据桥梁结构状态的划分等级赋予节点离散值域,按时间序列对模型进行数据更新。温欣岚等^[60]为解释工程中各类风险事件间存在的关联机理,将风险事件间的关联关系提炼为链式结构,初步提出了工程链式风险评估的整套流程和方法;以内罗毕国家公园特大桥施工过程中风险评估为例,结果表明,链式风险评估方法尽管存在计算量大、评估较繁杂等不足,但评估结果更加真实全面。可见,桥梁风险事件随时间发展的变化关系逐步得到重视,但仍需要大幅度简化风险事件之间关联关系,提高计算效率,并对风险事件之间影响程度展开量化研究。

4.2 桥梁施工动态风险评估研究进展

在动态风险评估领域,既有链式动态风险评估流程如图4所示,现有链式风险传递模型处在快速发展阶段,如丁猛^[61]基于贝叶斯网络构建桥梁施工风险评估模型,并引入实时检测数据更新模型,结合宁安大桥工程实例,实现了使用贝叶斯网络模型对桥梁整体技术状况进行动态评估的可行性;同样,苏冬文等^[62]以贝叶斯网模型为基础,根据时间变化确定条件概率和转移概率,并对模型进行动态更新,对高架桥支架施工风险实施了动态评估。综合桥梁工程及相关领域现有研究成果,Mortazavi等^[63]运用系统动力学详细分析了桥梁建设项目中关键风险因素的相互传递关系。

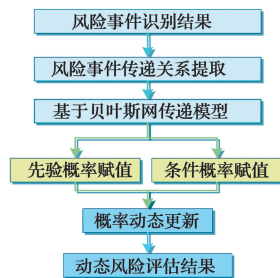


图4 链式动态风险评估基本流程

此外,在其他工程领域,龚文武^[64]将模糊集理论和信息扩散理论相结合,并将时间因素引入风险概率计算中,从而构建可变模糊集信息扩散动态风险评估模型,实现了对暴雨灾害链动态风险分析,其中较为精确地量化了风险因素和风险事件之间随时间的概率变化关系,降低现有概率赋值主观性过强的干扰;唐超等^[65]将厦门某地铁站深基坑工程施工阶段变形与应力监测数据作为风险评估参数,并建立风险评估指标体系,从而将监测数据根据报警值转化为相应的风险概率,实现深基坑施工阶段动态风险评估。范冰辉等^[66]基于BIM平台研发了跨海大桥施工BIM动态风险评估系统;通过专家意见与3D模型的交互,直观呈现不同施工进度时风险水平的形象变化,可为工程管理者提供各施工阶段的风险警示。上述研究成果均为桥梁施工风险动态评估提供了参考,可在未来应用到桥梁评估模型中,总结年度研究成果,动态评估领域主要进展如下:

1)链式传递模型的精细化修正。现有成果中,通过关键

因素选取,正逐步解决风险因素数目多、关联性复杂造成的计算量过大问题,提升了模型精准度。

2)基于监测数据的动态评估模型的探索。为监测数据作为动态评估模型中的基本参数提供了一种新的研究方向,评估中侧重分析监测数据与桥梁结构风险事件之间关联性。

3)模型智能化、可视化应用。动态风险评估基本目的仍是指导施工,动态风险评估模型与 BIM 平台的结合,推动模型智能化、可视化发展,能够精准指导施工。

5 热点与展望

2020 年,桥梁施工风险评估研究成果持续发展,在风险识别、风险概率和损失估计以及风险评价相关静态风险评估领域取得充足的进步,动态风险评估领域也正在逐渐深入。

鉴于现有桥梁规模越来越大,结构愈加复杂,施工风险因素更多且相互影响,仍需要进一步深化风险评估理论研究,在既有风险评估进展的基础上,展望未来有待重点发展的几个方面如下:

1)风险识别中引入交叉学科,通过风险识别+人工智能的结合,构建风险源数据库。

2)风险概率定性估计中,需要进一步发展考虑不确定性的概率客观评估方法。

3)风险评价方法中,可从通过扩展置信规则库角度,展开模型优化研究;并从基于数据场的高斯混合模型展开新的评价方法研究。

4)动态风险评估中,施工进度及风险控制下的风险动态识别与评估值得深入研究;构建施工监测数据与风险事件关联性的评估模型也是未来研究重点;将 BIM 技术与动态模型有机结合,可视化展示风险评估结果,实时指导施工风险控制同样是重要的发展方向之一。

参考文献:

- [1] 阮欣. 桥梁工程风险评估体系及关键问题研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.
- [2] LARSEN O D. Ship collision with bridges [M]. Zurich, Switzerland: International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE), 1993.
- [3] SKORUPKA D. Identification and initial risk assessment of construction projects in Poland [J]. Journal of Management in Engineering, 2008, 24(3): 120-127.
- [4] DECÒ A, FRANGOPOL D M. Risk assessment of highway bridges under multiple hazards [J]. Journal of Risk Research, 2011, 14(9): 1057-1089.
- [5] 高翔, 王有志, 张雪. 桥梁工程风险分析研究综述[J]. 筑路机械与施工机械化, 2017, 34(7): 29-32.
- [6] 付彦超. 大型桥梁工程施工风险管理研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2012.
- [7] 王诗青. 公路桥梁风险评估关键技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [8] 谢功元. 山区桥梁建设期多因素风险评估方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2013.
- [9] 于云智. 潍坊白浪河大桥建设项目风险管理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
- [10] 刘长波. 轻轨两用单索面钢桁梁斜拉桥施工阶段风险评估[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2014.
- [11] 辛望, 吴钟良. 基于 WBS-RBS 方法的桥梁施工风险识别[J]. 科技视界, 2015(6): 77, 113.
- [12] SATHANANTHAN S, ONOUFRIOU T, RAFIQ M I. A risk ranking strategy for network level bridge management [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2010, 6(6): 767-776.
- [13] DAVIS-MCDANIEL C, CHOWDHURY M, PANG W, et al. Fault-tree model for risk assessment of bridge failure: Casestudy for segmental box girder bridges [J]. Journal of Infrastructure Systems, 2013, 19(3): 326-334.
- [14] SALIM W S W, LIEW M S, SHAFIE A. Qualitative fault tree and event tree model of bridge defect for reinforced concrete highway bridge [C]//InCIEC 2014, 2015: 639-650.
- [15] 刘佳. 高速公路桥梁施工中安全风险识别与评估的应用[J]. 工程建设与设计, 2020(18): 183-184.
- [16] 林孔钊, 王奇, 杨弘卿. 跨海桥梁施工过程风险事态识别与分析[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2020, 16(3): 338-340, 360.
- [17] 施洲, 纪锋, 杨仕力, 等. 五峰山长江大桥施工阶段风险评估研究[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(5): 71-78.
- [18] 覃勇. AI 架构在桥梁施工风险识别系统中的应用[J]. 西部交通科技, 2020(3): 92-94, 121.
- [19] KIM I, LEE Y H, CHOI J. BIM-based hazard recognition and evaluation methodology for automating construction site risk assessment [J]. Applied Sciences, 2020, 10(7): 2335.
- [20] 茆诗松. 高等概率论与数理统计(M). 北京: 高等教育出版社, 2011.
- [21] 陈小波, 吴欣, 董城. 基于 ALARP 的桥梁风险矩阵决策方法研究[J]. 公路工程, 2014, 39(1): 63-65.
- [22] 周健, 王红卫, 吴邵海. 盾构法施工风险的多态贝叶斯网络模型分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(2): 186-190, 202.
- [23] 王龙源. 基于模糊数学理论的桥梁工程质量评价研究:

- 以宁都北跨线桥为例[D]. 南昌:南昌大学, 2019.
- [24] CHEN T T, WANG C H. Fall risk assessment of bridge construction using Bayesian network transferring from fault tree analysis [J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2017, 23(2): 273-282.
- [25] ABDOLLAHZADEH G, RASTGOO S. Risk assessment in bridge construction projects using fault tree and event tree analysis methods based on fuzzy logic [J]. ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part B: Mechanical Engineering, 2015, 1(3): 031006.
- [26] NG K H, FAIRFIELD C A. Monte Carlo simulation for arch bridge assessment [J]. Construction and Building Materials, 2002, 16(5): 271-280.
- [27] 交通运输部工程质量监督局. 公路桥梁和隧道工程施工安全风险评估制度及指南解析[M]. 人民交通出版社, 2011.
- [28] 束景晓, 李杰, 陈淮, 等. 桥梁施工阶段风险损失量化研究[J]. 河南科学, 2011, 29(5): 580-582.
- [29] 张耿. 大跨度桥梁施工风险因素分析及损失评估方法研究[J]. 科技与企业, 2012(11): 266-267.
- [30] 王玉倩, 何光, 卞国炎. 桥梁工程施工风险损失分级研究[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(12): 117-123.
- [31] 刘琴. 山区高速公路桥梁运营期的安全风险评估[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2020, 16(6): 321-324.
- [32] 施洲, 刘东东, 纪锋, 等. 基于 WBS-RBS 的超大型沉井基础施工风险评估[J]. 铁道建筑, 2020, 60(8): 37-42.
- [33] 刘萌. 上跨高速铁路立交桥施工风险评估研究[D]. 北京:北京交通大学, 2020.
- [34] 韦家钧. 大型桥梁工程施工安全风险评估体系研究[J]. 西部交通科技, 2020(3): 107-109.
- [35] ARGYROUDIS S A, NASIOPOULOS G, MANTADAKIS N, et al. Cost-based resilience assessment of bridges subjected to earthquakes [J]. International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment, 2021, 12(2): 209-222.
- [36] 巩春领. 大跨度斜拉桥施工风险分析与对策研究[D]. 上海:同济大学, 2006.
- [37] 谢海涛. 桥梁施工风险评估实用方法研究及其在钻孔灌注桩施工中的应用[D]. 长沙:中南大学, 2009.
- [38] 刘庆昌. 针对桥梁工程施工安全风险评估研究[D]. 济南:山东大学, 2017.
- [39] 陈国华, 吴武生, 徐三元, 等. 基于 WBS-RBS 与 AHP 的跨海桥梁工程施工 HSE 风险评价[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(9): 51-57.
- [40] 刘沐宇, 荆武, 张睿智. 基于模糊故障树理论的双壁钢围堰水中墩施工风险分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2014, 36(6): 34-40.
- [41] 赵延龙. 基于贝叶斯网络的大跨径斜拉桥上部结构施工安全风险分析与控制[D]. 重庆:重庆交通大学, 2013.
- [42] 刘英富. 桥梁施工风险评估方法研究[D]. 西安:长安大学, 2005.
- [43] 刘文荣, 徐岳. 自锚式悬索-斜拉组合体系桥梁施工工期结构安全评价[J]. 现代交通技术, 2010(4): 31-35.
- [44] 曹茹接. 锚锭沉井基础施工过程动态模拟与安全性能评估[D]. 重庆:重庆交通大学, 2017.
- [45] 赵有明, 李冰, 牛亚洲, 等. 南京长江第四大桥北锚碇沉井基础施工监控技术[J]. 桥梁建设, 2009(Sup1): 66-69.
- [46] 门广鑫. 特殊结构桥梁的施工监控方案研究[J]. 北方交通, 2020(6): 15-17.
- [47] 张骏, 李擎. 基于一图四表法的铁路建设工程质量风险管理信息化研究[J]. 铁路计算机应用, 2014, 23(12): 13-17.
- [48] 徐佳昕, 游波, 施式亮, 等. 基于层次分析法的桥梁施工风险识别及评估分析[J]. 矿业工程研究, 2020, 35(1): 59-64.
- [49] 刘小燕, 邹爱平, 朱杰, 等. 大跨度桥梁挂篮施工风险评估[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2020, 17(4): 16-22.
- [50] 汤天明, 管义能, 王国斌, 等. 武汉青山长江公路大桥施工阶段安全风险评估[J]. 桥梁建设, 2020, 50(Sup1): 38-43.
- [51] 史洪春. 桥梁建设项目风险识别与评估研究——以 C 桥梁桥墩建设工程为例[D]. 山东 青岛:青岛科技大学, 2020.
- [52] 雷佳. 中开高速银湖湖特大桥施工安全风险研究[D]. 郑州:郑州大学, 2020.
- [53] 杨隆浩, 叶菲菲, 王应明. 基于扩展置信规则库联合优化的桥梁风险评估[J]. 系统工程理论与实践, 2020, 40(7): 1870-1881.
- [54] 张欢, 郝伟, 顾伟红. 基于数据场聚类的拉林铁路隧道施工风险评估[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(7): 1874-1882.
- [55] 戴良军, 朱大勇, 程涛, 等. 陡峭岩面双壁钢围堰稳定性分析及风险评估[J]. 中国公路学报, 2020, 33(1): 120-127, 137.
- [56] 李存斌, 陆龚曙. 工程项目风险元传递的系统动力学模型[J]. 系统工程理论与实践, 2012, 32(12): 2731-2739.

- [57] JHA M K. Dynamic Bayesian network for predicting the likelihood of a terrorist attack at critical transportation infrastructure facilities [J]. *Journal of Infrastructure Systems*, 2009, 15(1): 31-39.
- [58] 康俊涛, 刘洋. 桥梁施工安全性评价的贝叶斯网络方法研究[J]. *中国安全科学学报*, 2016, 26(7): 157-162.
- [59] 贾布裕, 余晓琳, 颜全胜. 基于离散动态贝叶斯网络的桥梁状态评估方法[J]. *桥梁建设*, 2016, 46(3): 74-79.
- [60] 温欣岚, 罗占业, 樊美娜, 等. 链式风险评估方法研究及工程应用[J]. *中国安全生产科学技术*, 2019, 15(3): 154-160.
- [61] 丁猛. 基于贝叶斯网络的混凝土梁式桥综合评估方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [62] 苏冬文, 朱威. 基于贝叶斯网络的高架桥支架施工风险动态评估模型[J]. *市政技术*, 2020, 38(4): 65-69.
- [63] MORTAZAVI S, KHEYRODDIN A, NADERPOUR H. Risk evaluation and prioritization in bridge construction projects using system dynamics approach [J]. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 2020, 25(3): 04020015.
- [64] 龚文武. 暴雨灾害链动态风险分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [65] 唐超, 李庶林, 陈煌煜, 等. 基于监测数据的地铁深基坑施工阶段动态风险评估[C]//第 29 届全国结构工程学术会议论文集. 武汉, 2020: 395-403.
- [66] 范冰辉, 王素裹, 刘益宝. 基于 BIM 的跨海大桥施工动态风险评估与可视化平台[J]. *土木工程与管理学报*, 2020, 37(3): 73-78, 84.

(编辑 王森卉)