

基于层次分析-模糊综合评价法的 桥梁火灾风险评估体系

孙 博, 肖汝诚

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 基于火灾分析理论和火灾场景分析进行桥梁火灾风险识别, 建立多层次桥梁火灾风险评估指标体系; 将模糊数学引入层次分析方法, 结合传统的定性分析方法和定量分析方法各自的优势, 采用层次分析-模糊综合评价法(AHP-FCE)估计风险概率和风险损失. 应用层次分析法(AHP)建立各指标权重, 利用模糊综合评价法(FCE)进行多层次综合评判; 根据风险概率和风险损失估计值及其等级标准, 通过二维风险评价矩阵获得桥梁火灾风险水平并给出基本的风险控制准则. 运用上述评估体系对某跨江大桥方案火灾安全风险进行了分析评估.

关键词: 桥梁火灾安全; 层次分析法; 模糊综合评价法

中图分类号: U442

文献标志码: A

qualitative evaluation method. The weighting coefficients of the indexes were calculated using the analytic hierarchy process (AHP) while the fuzzy comprehensive evaluation (FCE) was used to realize the multilayer comprehensive evaluation. Finally, the risk level of bridge fire safety was obtained by using the 2-dimension evaluation model based on the computed values of risk probability and risk loss and the evaluation criteria; and the basic risk control principles were given. As an example of engineering application, the fire risk level of a partially cable-stayed bridge was assessed by using the proposed fire risk assessment system.

Key words: bridge fire safety; analytic hierarchy process (AHP); fuzzy comprehensive evaluation (FCE)

Bridge Fire Risk Assessment System Based on Analytic Hierarchy Process-Fuzzy Comprehensive Evaluation Method

SUN Bo, XIAO Rucheng

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Little attention is usually paid to the fire safety problem of bridge structures in the plan and design stage. This paper established a complete bridge fire risk assessment system to realize the assessment and prediction of the potential bridge fire risk in the plan and design stage. First, a multilayer risk evaluation index system of bridge fire safety was proposed by risk identification process based on performance-based and fire scenario analysis. Then by innovatively introducing fuzzy mathematics into the analytic hierarchy process, the AHP-FCE method was presented for evaluating the risk probability and risk loss, integrating the advantages of traditional quantitative evaluation method and

建筑及隧道火灾由于发生的频率较高, 火灾造成的损失严重, 因而受到了普遍的重视, 研究工作广泛而深入. 桥梁由于开放式的结构特性和火灾发生频率相对较小, 其火灾安全问题一直未能受到足够重视, 火灾安全在桥梁结构设计阶段几乎是被忽略的. 然而工程实践表明, 桥梁运营过程中仍存在不可忽视的火灾安全风险因素. 调查表明, 近 20 年来美国高速公路平均每年发生 376 000 起车辆火灾事故, 约造成 570 人伤亡和 12.8 亿美元经济损失^[1]. 尤其是大型油罐车及船舶引起的火灾, 或者是桥梁结构周边的易燃易爆物品存放仓库引发的火灾, 一旦发生则会造成惨重的人员伤亡与经济损失, 影响巨大. 2007 年 4 月 29 日清晨, 一辆大型油罐车在位于美国加州奥克兰市一处立交桥发生翻车, 所引起的火灾造成该立交至少两处垮塌, 由此造成的经济损失超过 900 万美元, 其中包括桥梁修复及交通控制等巨额费用^[2]. 对于此类情况, 在规划设计阶段建立相应

收稿日期: 2014-06-12

基金项目: 国家“九七三”重点基础研究发展计划(2013CB036300); 江西省交通厅重大科研项目(2012C0002)

第一作者: 孙 博(1988—), 男, 博士生, 主要研究方向为桥梁风险分析, 桥梁耐久性. E-mail: 2012sunbo@tongji.edu.cn

通讯作者: 肖汝诚(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为桥梁设计与分析理论, 桥梁管理系统.

E-mail: xiaorc@tongji.edu.cn

的桥梁火灾风险评估体系及有效的风险评估方法来预防桥梁潜在的火灾安全风险是十分必要的。

目前,国内外的火灾风险评估研究多集中于建筑与隧道等结构. 田玉敏等^[3]建立了适用于 4 类建筑物的火灾风险评价模型,给出了火灾风险等级的划分方法,并利用层次分析法确定了各评价指标的权重;Yu^[4]应用模糊综合评价法获得了历史建筑的火灾风险因素,并对一组寺庙建筑的火灾风险进行了评估. 而在桥梁火灾方面,大多数研究集中于灾后桥梁状态评估及修复,在规划和设计阶段的研究仍旧停留在抗火设计理论层次,系统的火灾风险评估研究工作几乎处于空白状态. Martha Davis 等^[5]采用火灾后检测和试验手段分析了比尔威廉河桥在发生一起油罐车火灾后的状态;刘其伟等^[6]结合江苏省海安县千年大桥工程实例,介绍了火灾受损后桥梁的检测评估方法和加固设计技术的应用;房帅平^[7]采用有限元方法,对桥梁工程普遍采用的预应力混凝土箱梁桥进行了抗火性能研究.

在已有的研究中,层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)由于具有实用、简洁和系统的特点被广泛应用于工程领域的风险评估,但是其在应用过程中由于无法有效处理工程问题的内在不确定性和不精确性也受到一定制约^[8]. 本文引入模糊数学(fuzzy set)的概念来解决层次分析法存在的缺陷. 基于模糊理论的风险评估方法可以通过考虑各个风险因素指标对系统的影响程度来处理传统数学方法无法考虑到的不确定性^[9],模糊综合评价法(fuzzy comprehensive evaluation, FCE)是其中应用最为广泛的方法.

本文针对桥梁规划设计阶段火灾风险评估研究方面的空白,建立完整的包括风险识别、风险估计、风险评价及风险控制四个阶段的桥梁火灾风险评估体系. 在系统分析桥梁火灾安全可能存在的风险及影响因素的基础上,提出了桥梁火灾风险的指标体系,同时结合层次分析与模糊综合评判各自优点,采用层次分析-模糊综合评判法(AHP-FCE)对桥梁火灾安全风险进行综合估计,基于二维评价矩阵进行风险评价并给出基本风险控制准则,最后将成果应用于某跨江大桥方案的火灾风险评估.

1 桥梁火灾风险识别

风险识别是风险评估的第一阶段,是风险评估其余阶段的重要基础^[10]. 在桥梁火灾安全问题中,风

险识别的核心是要确定桥梁结构的危险部位及其对火灾的敏感性,主要包括火灾分析理论、火灾场景分析及火灾风险源分析三方面内容,如图 1 所示.

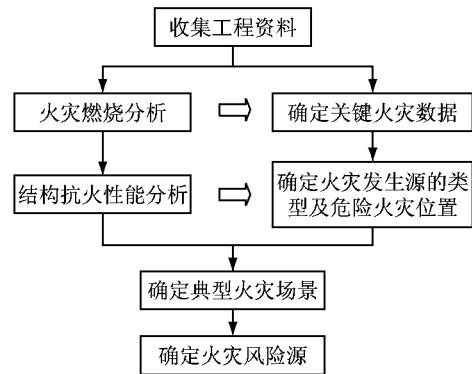


图 1 桥梁火灾风险识别流程

Fig. 1 Flowchart of bridge fire risk identification

1.1 桥梁火灾分析理论

桥梁火灾分析理论是场景分析及风险源分析的基础,主要包括火灾燃烧分析及结构抗火性能分析^[7]. 火灾燃烧分析主要通过对火灾燃烧特点和发展过程的分析确定火灾荷载;结构抗火性能分析通过结构抗火设计方法与理论,确定桥梁结构的抗火设计要求、高温下材料特性、构件的临界温度及抗火承载力等.

1.2 桥梁火灾场景分析

火灾场景是对不同火灾类型从火灾开始燃烧至达到顶峰,到最后造成结构破坏的全过程^[11]. 桥梁火灾场景分析的主要内容包括:

(1) 分析桥梁结构及周边环境的空间分布,确定火灾发生源的类型及危险火灾位置.

(2) 基于火灾燃烧分析,确定关键火灾数据,如最大释热速率、持续时间等.

(3) 结合结构抗火性能分析确定危险火灾场景.

表 1 给出了某跨江大桥方案的典型火灾场景,由于桥梁上游存在大型油库,可以看出风速较大时船舶、油库及码头流火引起的火灾是最为不利的火灾场景.

1.3 桥梁火灾风险源分析

火灾风险源是指能够给结构火灾安全带来积极或消极作用的关键因素. 根据以往火灾风险评估经验,可以认为其风险源主要包括结构因素、环境因素、管理因素及人员因素几个方面. 对于不同的桥梁工程,在管理及人员因素方面的火灾风险源基本相同;而在结构及环境因素方面,应结合桥梁工程实际

表 1 典型火灾场景

Tab.1 Typical fire scenarios

危险火灾场景	最大释热速率/MW	风速/(m·s ⁻¹)	持续时间/min	说 明	
Fire 1	5	小	25	小车火灾	
Fire 2	5	大	25	小车火灾	
Fire 3	20	小	120	公共汽车/ 运货汽车火灾	一般性 车辆火灾
Fire 4	20	大	120	公共汽车/ 运货汽车火灾	
Fire 5	80	小	360	油罐车火灾	
Fire 6	80	大	360	油罐车火灾	
Fire 7	760	小	720	船舶火灾	
Fire 8	760	大	720	船舶火灾	极端
Fire 9	760	小	720	油库及码头 流火火灾	不利火灾
Fire 10	760	大	720	油库及码头 流火火灾	

情况具体分析。

图 2 给出了某跨江大桥方案的关键火灾风险源,由于存在船舶火灾、油库及码头流火火灾等极端不利火灾场景,在结构及环境因素方面的风险源重点关注了油库及码头的影响。

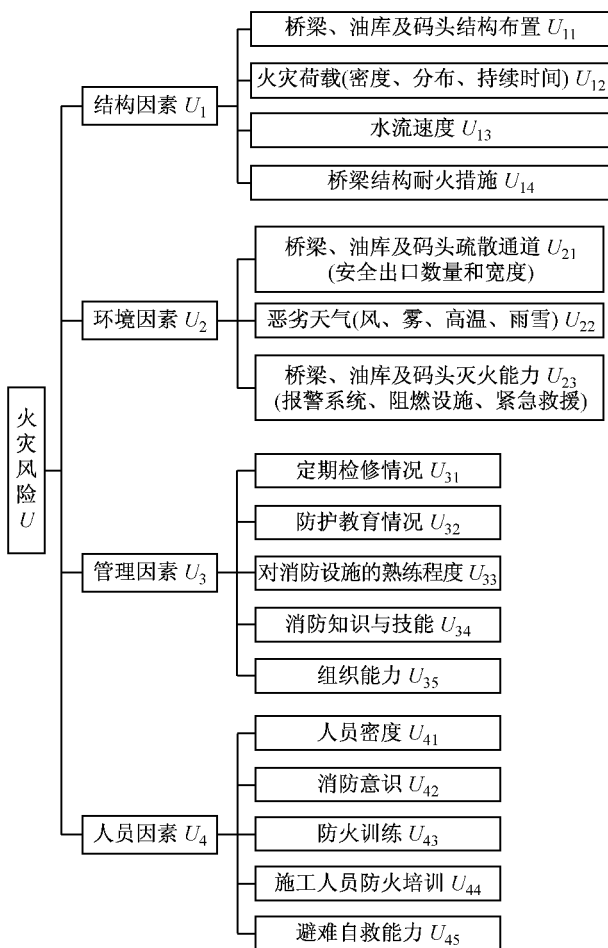


图 2 桥梁火灾风险评估指标体系

Fig.2 Index system of bridge fire risk assessment

2 桥梁火灾风险估计

风险估计的主要任务是基于风险识别成果,分析目标指标的风险概率和风险损失,是整个风险评估过程中最为复杂也最为关键的核心步骤. 风险概率与损失的分析方法主要分为定性方法(专家调查法)和定量方法(概率分析法、层次分析法、事故树法及模糊综合分析法)^[3-6],量化的火灾风险分析结果更加符合桥梁设计管理人员的决策需要。

桥梁火灾由于缺少实际统计资料,概率分析法难以实施;同时,火灾风险评估关注的是潜在火灾对结构的影响程度,无需深入挖掘影响因素间的逻辑关系,采用故障树分析也是没有必要的. 层次分析与模糊综合评判相结合的方法(AHP-FCE)更加符合决策过程的层次化和数量化需求,同时亦考虑了分析的不确定性,适用于桥梁火灾风险评估. 其主要步骤包括:建立层次模型、建立评语集、建立各评估指标权重集、建立隶属度矩阵和多层次综合评判。

2.1 建立层次模型

建立多层次评估模型是层次分析法的主要步骤之一,其大部分工作已在风险识别中完成. 基于火灾风险源的识别,将桥梁火灾风险的目标指标 U 分为 m 个子指标 $U_i, i=1, 2, 3, \dots, m$, 得到相应的一级指标集 $U=(U_1, U_2, U_3, \dots, U_m)$. 对于每一个一级指标 U_i , 又可以继续分为 n 个二级指标 $U_{ij}, j=1, 2, 3, \dots, n$, 得到相应的二级指标集 $U_i=(U_{i1}, U_{i2}, U_{i3}, \dots, U_{ij})$. 这样便把火灾风险指标分为两级,得到一个三层次的桥梁火灾风险评估指标体系,如图 2 所示。

2.2 建立评语集

评语集是用于确定指标因素集中每个指标状态的集合, $V=(V_1, V_2, V_3, \dots, V_k)$, V_k 代表不同的风险概率或损失等级. 在桥梁工程风险评估中, V 通常被划分为 5 个等级($k=5$), $V=($ 极低, 低, 中, 高, 极高). 同时大多数情况下为得到最终的风险评价结果, 风险概率和风险损失的等级均需考虑. 表 2 和表 3 给出了不同风险概率和风险损失等级的描述^[12].

2.3 建立权重集

权重分析是层次分析法另一重要内容, 权重集是表明各个层次风险指标在各个层次指标因素集中的重要程度的集合. 权重分析包含三个主要步骤: 构造优先关系判断矩阵、构造模糊一致判断矩阵以及计算权重集。

表 2 风险概率等级标准

Tab.2 Risk probability evaluation criteria				
V_k	评分	区间概率	等级	描述
极低	0~0.2	$(0, 10^{-6}]$	一级	看来不可能, 但仍有发生的可能性
低	0.2~0.4	$(10^{-6}, 10^{-3}]$	二级	不可能, 但仍有理由会发生
中	0.4~0.6	$(10^{-3}, 10^{-2}]$	三级	多次发生
高	0.6~0.8	$(10^{-2}, 10^{-1}]$	四级	将频频发生
极高	0.8~1.0	$(10^{-1}, 1]$	五级	接二连三地发生

表 3 风险损失等级标准

Tab.3 Risk loss evaluation criteria				
V_k	评分	等级	描述	
极低	0~0.2	一级	较少较轻或不存存在伤人事故; 损失 3 万元以下; 没有或较少的工程附属破坏, 对工期的影响小于 3 d; 没有或较少的环境破坏	
低	0.2~0.4	二级	无死亡, 不超过 1 人重伤; 财产损失 3 万~30 万元; 存在较轻度的工程附属系统破坏, 对工期影响大于 3 d 小于 15 d; 对环境有临时严重破坏	
中	0.4~0.6	三级	1 人死亡 10 人以下重度伤人; 财产损失 30 万~300 万元; 工程附属系统破坏严重破坏, 工程主系统轻度破坏, 对工期的影响大于 15 d 小于 6 个月; 对环境有长期的影响	
高	0.6~0.8	四级	人员死亡 1 到 10 人; 财产损失 300 万~3 000 万元; 工程主系统破坏, 对工期影响大于 6 个月小于 24 个月; 较严重的环境破坏	
极高	0.8~1.0	五级	人员死亡 10 人以上; 财产损失 3 000 万元以上; 工程系统破坏, 对工期影响大于 24 个月; 对环境具有永久严重的影响	

2.3.1 构造优先关系判断矩阵

优先关系判断矩阵反映了同一指标因素集内每两个指标因素间的优先关系, 通常由专家调查法对同一层次不同指标因素对桥梁火灾风险的重要性进行比较分析获得. 如对二级指标集 U_i 的判断矩阵为

$$a = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $a_{ij} (i=1, 2, 3, \dots, n; j=1, 2, 3, \dots, n)$ 为指标因素 U_{ei} 相对于 U_{ej} 的重要性 ($e=1, 2, 3, \dots, m$). 现有研究中用于进行两两比较的数值标度法有很多且各有优劣^[13], 本文采用 3-标度法获得 a_{ij} .

$$a_{ij} = \begin{cases} 0.5 & t(i) = t(j) \\ 1.0 & t(i) > t(j) \\ 0 & t(i) < t(j) \end{cases} \quad i, j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2)$$

式中: $t(i), t(j)$ 为指标因素 U_{ei} 和 U_{ej} 在两两比较中的重要性. 3-标度法属于互补型标度, 并且与人们的日常逻辑思维相协调.

2.3.2 构造模糊一致判断矩阵

模糊一致判断矩阵是指具有中分传递性和鲁棒性的判断矩阵, 符合人们决策思维的心理特征. 引入模糊一致判断矩阵可以避免由于判断的主观性带来的一致性检验程序. 有关模糊一致判断矩阵的一致性证明见李永等^[14]、姚敏等^[15]的研究. 由优先关系判断矩阵 a 可得到模糊一致判断矩阵 $A=(A_{ij})_{n \times n}$.

$$A_{ij} = \frac{k_i - k_j}{2n} + 0.5$$

$$k_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (3)$$

2.3.3 计算权重集

由判断矩阵获得权重集的方法有很多且各有优劣^[13], 本文采用和行归一法^[12]由模糊一致判断矩阵 A 计算权重. 首先将 A 中元素 A_{ij} 按列进行归一化得矩阵 $E=(e_{ij})_{n \times n}$.

$$e_{ij} = \frac{A_{ij}}{\sum_{i=1}^n A_{ij}} \quad (4)$$

其次将 E 中元素按行相加得向量 $F=(f_1, f_2, f_3, \dots, f_n)$, 对向量 F 进行量纲一化处理得权重集 $W_i=(w_{i1}, w_{i2}, w_{i3}, \dots, w_{in})^T$.

$$w_{ij} = \frac{f_j}{\sum_{e=1}^n f_e} \quad j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (5)$$

一级指标集 U 的权重集 W 可通过同样方法求得, 对于一些特定的层次结构, 也可以通过专家调查意见直接指定一级指标的权重.

2.4 建立隶属度矩阵

隶属度矩阵是用来描述各个指标对于评语集各个等级的隶属度的矩阵, 是基础的评价结果.

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1k} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2k} \\ \vdots & & & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nk} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: $r_{ij} (i=1, 2, 3, \dots, n; j=1, 2, 3, \dots, k)$ 为第 i 个指标关于第 j 个评语等级的隶属度. 对于可以量化的指标因素, 可通过隶属度函数^[16]由指标特征值计算其隶属度; 但对于大多数工程领域风险分析问题, 指标因素往往很难量化, 可采用专家调查法由统计手段获得其隶属度. 表 4 给出了结构因素指标集 $U_1=(U_{11}, U_{12}, U_{13}, U_{14})$ 的风险概率专家调查结果.

表 4 结构因素集风险概率专家调查表

Tab. 4 Risk probability investigation results of structure sub-factors

结构因素	评分				
	极低	低	中	高	极高
U_{11}	0.04	0.09	0.15	0.22	0.60
U_{12}	0.05	0.09	0.23	0.33	0.30
U_{13}	0.15	0.11	0.11	0.40	0.29
U_{14}	0.07	0	0.10	0.40	0.43

2.5 多层次综合评判

多层次综合评判是指基于所得隶属度矩阵和权重集由底层至目标层,逐层向上计算各层次评判集,并最终获得目标指标的风险估计结果的过程。

2.5.1 二级指标综合评判

由二级指标权重集 W_i 和隶属度矩阵 R_i , 可得到二级指标评判集 B_i 。

$$B_i = W_i^T \circ R_i = (\omega_{i1}, \omega_{i2}, \dots, \omega_{im}) \circ \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1k} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nk} \end{bmatrix} = (b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{ik}) \quad (7)$$

$i = 1, 2, \dots, m$

式中：“ \circ ”为模糊运算符。本文采用 Zadeh 算子,为主因素决定型,即 $M(\wedge, \vee)$,突出主要因素的影响而忽略其他次要因素^[17],即

$$b_{ij} = \bigvee_{j=1}^n (\omega_{ij} \wedge r_{je}) \quad (8)$$

$i = 1, 2, 3, \dots, m$
 $j = 1, 2, 3, \dots, n$
 $e = 1, 2, 3, \dots, k$

对 B_i 作归量纲一化处理。

2.5.2 一级指标综合评判

由二级指标评判集 B_i , 可得一级指标隶属度矩阵 R 。

$$R = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_1^T \circ R_1 \\ W_2^T \circ R_2 \\ \vdots \\ W_m^T \circ R_m \end{bmatrix} = [r_{ij}]_{m \times k} \quad (9)$$

考虑一级指标权重集 W , 可得一级指标评判集 B 。

$$B = W^T \circ R = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m) \circ \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_m \end{bmatrix} = (b_1, b_2, \dots, b_k) \quad (10)$$

对 B_i 作量纲一化处理。

对于 W 直接由专家经验给出的情况, B 可以由以下公式得到:

$$B = W^T \cdot R = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m) \cdot (B_1, B_2, \dots, B_m)^T \quad (11)$$

2.5.3 目标指标综合评判

对于一些复杂问题,层次模型可能存在多个中间层,依据上述步骤由底层向上层逐层进行评判,可得评判集 B 。由评语集 V 评分区间中间值建立评分集 $G = (0.1, 0.3, 0.5, 0.6, 0.9)$, 可得目标指标 U 的风险估计结果 D 为

$$D = B \cdot G^T = (b_1, b_2, \dots, b_k) \cdot (g_1, g_2, \dots, g_k)^T \quad (12)$$

3 桥梁火灾风险评价和控制

风险评价就是在风险识别和风险估计的基础上,综合风险概率估计结果 D_p 和风险损失估计结果 D_l 并结合相应风险评价模型,对风险进行综合评价,确定系统风险的整体水平与严重等级并给出相应的风险控制措施。火灾风险评价模型采用二维评价模型,如表 5 所示。表 6 给出了不同风险水平的控制措施准则。

表 5 风险评价模型

风险概率评分	风险水平				
	风险损失评分				
	0.0~0.2	0.2~0.4	0.4~0.6	0.6~0.8	0.8~1.0
0.0~0.2	I	I	II	II	III
0.2~0.4	I	II	II	III	III
0.4~0.6	I	II	III	III	IV
0.6~0.8	II	III	III	IV	IV
0.8~1.0	III	III	IV	IV	IV

表 6 风险控制准则

风险水平	接受准则	控制准则
I	可忽略	低风险水平,不需要采取风险应对措施和监控措施
II	可接受	中风险水平,不需要采取风险应对措施,需采取监控措施
III	不期望	高风险水平,必须采取风险应对措施和监控措施降低风险水平
IV	不可接受	极高风险水平,必须高度重视规避风险,否则应当不惜代价将风险降到不期望的水平

4 案例分析

某跨江大桥方案是一座跨越甬江的部分斜拉桥,跨境布置 50 m+110 m+465 m+110 m+50

$m=785$ m. 大桥周边环境较为复杂,越江线位从三官塘中石化油库用地东南侧穿过,由于越江工程处在油库的下游,油库火灾及其流火对大桥带来严重的火灾安全隐患,因此在桥梁设计规划阶段对大桥进行火灾风险评估是十分必要的.

4.1 建立权重集

由专家调查结果及式(1)~(5),可得火灾风险二级指标集 U_i 的权重集 W_i 为

$$W_1=(0.352\ 2,0.215\ 9,0.284\ 1,0.147\ 8)^T$$

$$W_2=(0.213\ 0,0.333\ 3,0.453\ 7)^T$$

$$W_3=(0.200\ 0,0.112\ 6,0.287\ 4,0.243\ 7,0.156\ 3)^T$$

$$W_4=(0.287\ 4,0.112\ 6,0.200\ 0,0.156\ 3,0.243\ 7)^T$$

一级指标集 U 的权重集 W 由专家经验直接给出

$$W=(0.25,0.25,0.25,0.25)^T$$

4.2 建立隶属度矩阵

由结构因素集风险概率专家调查结果,结构因素集 U_1 的风险概率隶属度矩阵 R_1 为

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0.04 & 0.09 & 0.15 & 0.22 & 0.60 \\ 0.05 & 0.09 & 0.23 & 0.33 & 0.30 \\ 0.15 & 0.11 & 0.11 & 0.40 & 0.29 \\ 0.07 & 0.00 & 0.10 & 0.40 & 0.43 \end{bmatrix}$$

其他二级指标隶属度矩阵 R_i 可由相同方法获得.

4.3 多层次综合评判

以风险概率估计为例,由计算所得 W_i 和 R_i 及式(7)~(8),可得二级指标评判集 B_i 为

$$B_1=(0.134\ 9,0.098\ 9,0.194\ 2,0.255\ 4,0.316\ 6)$$

$$B_2=(0.100\ 9,0.057\ 7,0.187\ 4,0.327\ 0,0.327\ 0)$$

$$B_3=(0.076\ 1,0.180\ 8,0.237\ 8,0.231\ 9,0.273\ 4)$$

$$B_4=(0.111\ 0,0.167\ 7,0.154\ 2,0.283\ 5,0.283\ 5)$$

由式(9)~(11),一级指标评判集 B 为

$$B=(0.25,0.25,0.25,0.25) \cdot \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \end{bmatrix} = (0.105\ 7,0.126\ 3,0.193\ 4,0.274\ 5,0.300\ 2)$$

由式(12),大桥风险概率评分为

$$D_p = B \cdot (0.1,0.3,0.5,0.7,0.9)^T = 0.607\ 4$$

同样地,可得风险损失评分为 $D_l=0.631\ 5$.

4.4 风险评价和控制

已知风险概率和风险损失估计结果分别为 $D_p=$

$0.607\ 4$ 和 $D_l=0.631\ 5$,又由评价矩阵可知,跨江大桥方案的火灾风险属于IV级风险,虽然在IV级风险中水平较低,但此类风险属于不可接受的极高风险水平,必须高度重视,规避风险,否则应当不惜代价将风险降到不期望的水平.

为达到上述目的,应采取消防设计、防火设计、船舶火灾防控和油库及码头防火等风险控制措施来降低火灾风险,其主要内容和控制原则包括:

(1) 消防设计措施.应采取有效的管理措施,减少(避免)火灾的发生;应完善消防主动防火灭火措施,迅速控制火灾,减小火灾危害,避免大桥主体结构在火灾下发生破坏.

(2) 防火设计措施.桥梁结构所采用的防火保护除了应具有良好的防火隔热性能、与结构的防腐面层相匹配外,还应具有良好的力学性能、耐久性、耐候性能,同时应兼顾外观和经济性能.

(3) 船舶火灾防控措施.应加强船员消防安全培训,增强船舶消防设施的建设,全面强化船舶消防安全监管,建立“人、物、机”一体的火灾监控体系.

(4) 油库及码头防火安全措施.基础设施建设应符合相关标准所规定的防火要求,包括安全距离、耐火等级、防爆设计、防雷击防静电设计、消防设施的配备及阻火器的设计等内容,油库及码头一旦发生火灾,应及时进行扑救.

(5) 采取控制措施后风险评价

表7给出了采取建议的风险控制措施后的风险评价结果及其与采取风险控制措施前的对比.从表7可以看出,采取控制措施后跨江大桥方案的火灾风险属于III级风险,成功降低至不期望的水平.

表7 风险评价结果对比

Tab.7 Comparison of risk evaluation results

阶段	风险概率		风险损失		风险水平
	评分	等级	评分	等级	
采取控制措施前	0.607 4	4级	0.631 5	4级	IV
采取控制措施后	0.490 2	3级	0.445 4	3级	III

5 结语

由于常常被投资和管理人员忽视,正确认识和识别桥梁在运营过程中可能存在的火灾安全风险非常重要.桥梁火灾风险评估可以使得桥梁火灾风险在规划设计阶段具有预见性,它有助于更好地理解桥梁火灾风险,防范灾难事故的发生,减少由此带来的损失.本文研究取得如下成果:

(1) 建立了完整的桥梁火灾风险识别流程,并

系统地分析了桥梁可能存在的火灾风险及影响因素,提出了桥梁火灾风险评估的指标体系。

(2) 结合层次分析与模糊综合评判各自的优点,采用层次分析-模糊综合评判法(AHP-FCE)建立了桥梁火灾安全风险估计流程。指标因素的权重通过层次分析法获得并引入模糊一致判断矩阵来保证一致性,同时引入模糊数学理论来更为有效地处理火灾安全风险问题中的不确定性。

(3) 结合不同风险概率、风险损失等级及其相应描述建立其与风险估计评分值的对应关系,得到风险概率及风险损失等级标准。基于二维评价矩阵建立了桥梁火灾安全风险评价方法,并给出了基本的风险控制准则。

(4) 通过以上研究工作,建立了一套桥梁火灾风险评估体系,用以在桥梁设计规划阶段分析评估桥梁的潜在火灾风险。根据某跨江大桥方案工程实际,运用该评估体系对其火灾安全风险进行了分析评估。案例分析表明,所提出的理论和方法能有效分析预测桥梁工程的火灾安全风险。

参考文献:

- [1] Garlock M, Paya-Zaforteza I, Kodur V, *et al.* Fire hazard in bridges: review, assessment and repair strategies [J]. *Engineering Structures*, 2012, 35: 89.
- [2] Kodur V, Gu L, Garlock M E M. Review and assessment of fire hazard in bridges [J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2010, 2172(1): 23.
- [3] 田玉敏,蔡晶菁. 建筑火灾风险评价方法及其软件系统研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2011, 19(1):118.
TIAN Yumin, CAI Jingjing. Study on software application system of fire risk assessment methods for buildings [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2011, 19(1): 118.
- [4] Yu K. Fuzzy comprehensive evaluation of fire safety risk of historic buildings based on fuzzy mathematics [J]. *International Journal of Applied Mathematics and Statistics*, 2013, 50(20): 396.
- [5] Martha Davis P E, Paul Tremel P E. Bill Williams river concrete bridge fire damage assessment [J]. *Structure*, 2008, 31.
- [6] 刘其伟,王峰,徐开顺,等. 火灾受损桥梁检测评估与加固处理[J]. *公路交通科技*, 2005, 22(2): 71.
- LIU Qiwei, WANG Feng, XU Kaishun, *et al.* Detection evaluation and repairing of fire damaged bridge [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2005, 22(2): 71.
- [7] 房帅平. 预应力混凝土箱梁桥抗火性能研究[D]. 西安:长安大学, 2011.
FANG Shuaiping. Research on fire resistance performance of prestressed concrete box girder bridge [D]. Xi'an: Changan University, 2011.
- [8] Tiryaki F, Ahlatcioglu B. Fuzzy portfolio selection using fuzzy analytic hierarchy process [J]. *Information Sciences*, 2009, 179(1): 53.
- [9] Maeda H, Murakami S. The use of fuzzy decision-making method in a large-scale computer system choice problem [J]. *Fuzzy Set and Systems*, 1993, 54(3): 235.
- [10] Tchankova L. Risk identification-basic stage in risk management [J]. *Environmental Management and Health*, 2002, 13(3): 290.
- [11] 杨响,曹丽英. 地铁火灾场景设计探讨[J]. *自然灾害学报*, 2006, 15(4): 121.
YANG Yun, CAO Liying. Preparatory study on scenario design for subway fire [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2006, 15(4): 121.
- [12] 张杰. 大跨度桥梁施工期风险分析方法研究[D]. 上海:同济大学, 2008.
ZHANG Jie. Study on risk analysis method of long-span bridges during construction [D]. Shanghai: Tongji University, 2008.
- [13] Dong Y, Xu Y, Li H, *et al.* A comparative study of the numerical scales and the prioritization methods in AHP [J]. *European Journal of Operational Research*, 2008, 186(1): 229.
- [14] 李永,胡向红,乔箭. 改进的模糊层次分析法[J]. *西北大学学报:自然科学版*, 2005, 35(1): 11.
LI Yong, HU Xianghong, QIAO Jian. An improved fuzzy AHP method [J]. *Journal of Northwest University: Natural Science*, 2005, 35(1): 11.
- [15] 姚敏,张森. 模糊一致矩阵及其在软科学中的应用[J]. *系统工程*, 1997, 15(2): 54.
YAO Min, ZHANG Sen. Fuzzy consistent matrix and its applications in soft science [J]. *Systems Engineering*, 1997, 15(2): 54.
- [16] Feng S, Xu L D. Decision support for fuzzy comprehensive evaluation of urban development [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1999, 105(1): 1.
- [17] 项贻强,吴强强,张婷婷. 基于AHP-FCE模型的桥梁设计风险评估研究[J]. *土木工程学报*, 2010, 43:275.
XIANG Yiqiang, WU Qiangqiang, ZHANG Tingting. The risk assessment of bridge design based on the AHP-FCE model [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2010, 43:275.