

基于层次分析法的桥梁运营期安全风险评估

蔡俊宇

(中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122)

摘要: 桥梁作为重要的交通基础设施,其安全性直接影响到交通运输的顺畅与公众的生命财产安全。随着使用年限的增加以及结构的逐渐老化,桥梁的安全性面临着越来越严峻的挑战。因此,科学有效地评估桥梁运营期的安全风险,及时发现潜在问题并采取适当的管理措施,显得尤为重要。为了实现这一目标,采用层次分析法对桥梁运营期安全风险进行综合评价,对主要的影响因素进行识别与分析。通过实际工程案例的分析研究,验证桥梁运营期风险评估体系及风险评估模型在实际工程应用中的适用性、科学性,从而为桥梁运营管理提供科学的决策依据。

关键词: 桥梁运营期;风险评估;层次分析法

中图分类号: U447;TU997

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)05-0122-05

Assessment on Safety Risk of Bridge Operation Period Based on Analytic Hierarchy Process

CAI Junyu

(PowerChina Huadong Engineering Corporation, Hangzhou 311122, China)

Abstract: As an important transportation infrastructure, the safety of bridges directly affects the smoothness of transportation and the safety of public life and property. With the increasing service life and the gradual aging of structures, the safety of bridges is facing increasingly severe challenges. Therefore, it is particularly important to scientifically and effectively assess the safety risks during the operation period of bridges, promptly identify the potential problems, and take the appropriate management measures. In order to achieve this goal, the analytic hierarchy process (AHP) is used to comprehensively evaluate the safety risks during the operation period of bridges, identify and analyze the main influencing factors. Through the analysis and research of actual engineering cases, the applicability and scientificity of the risk assessment system and risk assessment model during the bridge operation period in practical engineering applications are verified, providing scientific decision-making basis for bridge operation management.

Keywords: bridge operation period; risk assessment; analytic hierarchy process (AHP); bridge safety; comprehensive evaluation

0 引言

随着交通基础设施的不断发展,桥梁作为交通运输体系中的一部分,承载着极为重要的功能,其安全性也变得尤为重要。桥梁的安全性是一种可以确保桥梁在荷载作用下始终保持安全运行、避免因结构问题发生事故的能力。影响桥梁安全性的因素包含桥梁结构设计和施工质量、自然因素、环境因素等,也受定期检测和维护工作的影响。

随着桥梁使用年限的增加,其面临的安全风险也逐渐增多。在我国,桥梁的过度使用以及维护工

作的不及时,是导致其安全风险增加的重要因素,有效开展桥梁风险评估格外关键。桥梁风险评估是了解桥梁在运营期间存在的不稳定因素的有效手段,能有效得到桥梁潜在的危險及所处风险等级状况,是避免桥梁安全事故、保障公众安全的重要手段。

开展安全风险评估有助于掌握结构的危险状态,识别特定的风险源因素。层次分析法^[1]是美国学者 Saaty 提出的一种融合定性分析与定量分析的系统分析方法,该方法操作性强、原理简单,同时具有较强的严谨性,被广泛应用于复杂系统的分析与决策。Peng K^[2]等人以某悬索桥为例,采用层析分析-模糊聚类-德尔菲组合方法进行桥梁设计阶段风险评估,通过半定性半定量的方法,计算得到了各指标风险因素的风险等级以及全桥的设计安全方案。

收稿日期: 2025-01-24

作者简介: 蔡俊宇(1997—),女,硕士,工程师,从事桥梁设计工作。

刘沐宇^[3]等对大跨悬索桥主塔施工存在的主要风险因素进行挖掘与梳理,进而明确风险评价指标,建立多层次指标体系,并根据证据理论构建主塔施工风险综合评估模型,提出了一种新的大跨径悬索桥主塔施工风险评估方法。张源^[4]等梳理了桥梁风险评估领域进展,涵盖评估方法、单因素与多因素评估,阐释了常用评估方法、单因素风险类别以及不同因素和综合因素下的评估理论,为研究与实践提供参考。在其他学者的研究的基础上^[5-10],建立一种新的桥梁运营期安全风险分析综合评价指标体系,以期提供一种更加科学、可行的评估方法,从而为桥梁运营阶段安全管理体系的构建提供参考依据和指导方向。

1 层次分析法理论及评估步骤

利用 AHP 层次分析法对桥梁运营期间的安全风险进行综合评价,步骤如下。

1.1 建立层次结构模型

构建风险评估指标体系、进行风险识别是开展风险评估工作的根基与先决条件,通过收集与桥梁安全风险评估相关的文献、规范、档案资料等信息,首先开展风险辨识,对桥梁运营期风险评估相关指标进行归纳与分析,再通过咨询相关领域专家对拟定的风险指标进行补充与删减,最终从系统性、动态性、全面性、可行性等多个关键维度出发,构建了以桥梁自身因素、外界环境因素、管理因素 3 个一级指标以及 17 个二级指标的桥梁运营期安全风险评价指标体系,如表 1 所示。

1.2 构造判断矩阵

Saaty 等人提出的一致矩阵法,采用相对尺度将因素两两相互比较,尽可能的减少性质不同的诸因素相互比较的困难,以提高准确度。通过专家调查法将同一层次的不同指标对桥梁运营期安全风险的影响性进行两两比较,形成一个由判断系统构成的判断矩阵。为减少单个专家的主观性,本次评估邀请了 5 位经验丰富的桥梁健康监测与检测评估专家,构建判断矩阵,判断矩阵量化值及其含义如表 2 所示。

根据桥梁的实际运营情况,形成判断矩阵打分表,由此得到各指标因素的比较判断矩阵 U 。

$$U = \begin{pmatrix} 1 & a_1/a_2 & a_1/a_3 \\ a_2/a_1 & 1 & a_2/a_3 \\ a_3/a_1 & a_3/a_2 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

其中: a_1 、 a_2 、 a_3 为 A、B、C 三种指标的重要度比较。

表 1 桥梁运营期安全风险评价指标体系

目标层	准则层	指标层
桥梁运营期安全风险评估	桥梁自身因素 A	桥梁结构影响 A1
		桥梁规模 A2
		桥梁在役年限 A3
		桥梁加固改造情况 A4
		桥梁技术状况等级 A5
	外界环境因素 B	桥梁附近危险源数量 B1
		周围第三方施工影响 B2
		超载超限 B3
		车辆撞击风险 B4
		船舶撞击风险 B5
		桥梁所处区域位置 B6
		地质灾害风险 B7
		洪水影响 B8
		风、冰雪等自然天气影响 B9
	管理因素 C	养护管理 C1
		交通管理 C2
		应急管理 C3

表 2 判断矩阵量化值及含义

量化值	含义
1	指标 A 与 B 同等重要
3	指标 A 比 B 稍重要
5	指标 A 比 B 明显重要
7	指标 A 比 B 强烈重要
9	指标 A 比 B 极端重要
2、4、6、8	两相邻判断的中间值

选用方根法计算权重,式中 a_{ij} 为各重要程度比较值。

$$\overline{\omega}_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}} \quad (2)$$

将 $\overline{\omega}_i$ 规范化,得到权重向量计算值 ω_i 。

$$\omega_i = \frac{\overline{\omega}_i}{\sum_{i=1}^n \overline{\omega}_i} (i=1,2,3,\dots,n) \quad (3)$$

计算最大特征向量。

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij} \omega_j}{n \omega_i} \quad (4)$$

1.3 层次单排序及其一致性检验

得到最大特征向量 $\lambda_{\max}$ 后需要进行一致性检验,若 $CR < 0.1$,那么可认定此判断矩阵符合一致性检验的标准,数据有效;否则需考虑修正原判断矩阵。由此初步得到桥梁运营期安全风险评价指标权重的结果。

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (5)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (6)$$

式中:CI 为判断一致性指标;n 为判断矩阵阶数;CR

为随机一致性比率; RI 为随机一致性指标。
其中 RI 随机一致性指标取值如表 3 所示。

表 3 随机一致性指标取值										
矩阵阶数 n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI 值	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.32	1.41	1.46	1.49

1.4 层次总排序

利用层次单排序的计算得出的各项权重,在此基础上进行综合分析,从而确定各二级指标相对于目标层的权重。随后开展层序总排序操作,即进一步从整体层面考量,明确各层要素相对于上一层特定要素的重要性层级次序。

1.5 桥梁运营期安全风险评估汇总

本次评估的二级指标标度设定范围为 1~5。其中标度 1 代表较小影响,标度 5 代表很大影响。让专家根据自身经验对各项风险指标的影响程度进行打分,并取各位专家打分的取平均值作为各二级指标的标度。

一级指标的标度值 B_i ,是依据与之对应的各二级指标的标度数值,并结合相应权重,经计算后所得出的结果,计算公式见式 7。目标层桥梁运营期安全风险评估的标度值 A ,是依据与之对应的一级指标,并结合相应权重,经计算后所得出的结果,计算公式见式 8。

$$\bar{B}_i = \sum_{j=1}^n u_{ij} \omega_{ij} \tag{7}$$

式中: u_{ij} 为每个二级指标的标度值, ω_{ij} 为每个二级指标对应的权重值。

$$A = \sum_{i=1}^n B_i \omega_i \tag{8}$$

目标层综合安全状况百分制的分值需要通过计算公式换算后确定。

$$\text{换算所得分值} = 100 \times \frac{(5 - \text{目标层综合安全状况的标度值})}{4} \tag{9}$$

换算所得分值即为目标层综合安全状况评估的最终分值。

将计算得出的结果与风险等级评价表进行对照,从而确定评估结果所属的风险级别。风险评价等级如表 4 所示^[11]。

2 案例分析

2.1 工程概况

Z 桥位于 J 市,始建于 2007 年。该桥全长为 51.04 m,桥梁分为左右两幅,单幅桥宽 17 m。上部

表 4 风险等级评价表

风险等级	分值区间	风险发生概率
一级(低风险)	(90,100]	风险发生可能性很低,可忽略
二级(较低风险)	(80,90]	风险发生可能性低,但不排除发生的可能性
三级(一般风险)	(70,80]	风险发生概率一般
四级(较高风险)	(60,70]	风险发生概率较高
五级(高风险)	[0,60]	风险发生概率很高

结构采用 3×13 m 预应力混凝土空心板,桥面连续;下部结构为桩柱式桥墩,U 型桥台,基础采用扩大基础。单幅桥面设有 3 条快速车道。该桥设计荷载为城市-A 级荷载,限制最大载重为 30 t,设计使用年限为 100 年。经实地勘察,观察到该桥有大型车辆通过,中央分隔带处设有电力铁塔,重要防护目标有住宅、河流、公司、学校,该桥是都市区快速路网的一部分,属于城市主干道路,车流量较大,有超载、超限情况存在。现对该桥的安全性进行风险评估。

2.2 基于层次分析法的安全风险评估流程

2.2.1 一级指标权重的计算

通过 AHP 层次分析法,邀请五名专家对一级指标进行打分,构造判断矩阵。以专家 1 为例,构造的判断矩阵打分表如表 5 所示。

表 5 专家 1 权重打分表

	A 桥梁自身因素	B 外界环境因素	C 管理因素
A 桥梁自身因素	1	3	4
B 外界环境因素	1/3	1	3
C 管理因素	1/4	1/3	1

由此可以得到判断矩阵 U_1 。

$$U_1 = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 4 \\ 1/3 & 1 & 3 \\ 1/4 & 1/3 & 1 \end{pmatrix} \tag{10}$$

同理,根据其他四位专家的权重打分表,分别列出判断矩阵 $U_2、U_3、U_4、U_5$ 。

$$U_2 = \begin{pmatrix} 1 & 9 & 7 \\ 1/9 & 1 & 3 \\ 1/7 & 1/3 & 1 \end{pmatrix} \tag{11}$$

$$U_3 = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 5 \\ 1/3 & 1 & 3 \\ 1/5 & 1/3 & 1 \end{pmatrix} \tag{12}$$

$$U_4 = \begin{pmatrix} 1 & 4 & 2 \\ 1/4 & 1 & 1 \\ 1/2 & 1 & 1 \end{pmatrix} \tag{13}$$

$$U_5 = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 5 \\ 1/3 & 1 & 2 \\ 1/5 & 1/2 & 1 \end{pmatrix} \tag{14}$$

根据前文公式计算权重向量及最大特征向量,

并对其进行一致性检验,计算结果如表6所示。

通过计算5位专家的权重,并剔除未通过一致性

表6 桥梁运营期风险因素权重赋值及一致性分析表

	ω_A	ω_B	ω_C	$\lambda_{\max}$	CI	CR	一致性检验
专家1	0.614	0.268	0.117	3.074	0.037	0.071	通过
专家2	0.790	0.138	0.072	3.206	0.103	0.198	不通过
专家3	0.637	0.258	0.105	3.039	0.019	0.037	通过
专家4	0.584	0.184	0.232	3.054	0.027	0.052	通过
专家5	0.648	0.230	0.122	3.004	0.002	0.004	通过

检验的专家2的打分数据,归一化求得最终权重。求得一级指标的相对权重为:

$$\omega_R = (\omega_A, \omega_B, \omega_C) = (0.654, 0.216, 0.130) \quad (14)$$

2.2.2 二级指标权重的计算

依照上述方法与步骤,逐一搭建起各个二级指标所对应的判断矩阵。为减少篇幅及计算,本文对五位专家的打分值进行平均求值,得到了各层次的判断矩阵,计算出最大特征值,进行一致性检验,专家打分及结果计算如表7~表9所示。

表7 桥梁自身因素判断矩阵及权重

	A1 桥梁结构影响	A2 桥梁规模	A3 桥梁在役年限	A4 桥梁加固改造情况	A5 桥梁技术状况等级	单层相对权重
A1 桥梁结构影响	0.055	0.043	0.037	0.068	0.088	0.055
A2 桥梁规模	0.111	0.086	0.049	0.091	0.110	0.086
A3 桥梁在役年限	0.221	0.257	0.146	0.091	0.088	0.146
A4 桥梁加固改造情况	0.221	0.257	0.439	0.272	0.220	0.272
A5 桥梁技术状况等级	0.277	0.343	0.730	0.545	0.441	0.441

表8 外界环境因素判断矩阵及权重

	B1 桥梁附近危险源数量	B2 周围第三方施工影响	B3 超载超限	B4 车辆撞击风险	B5 船舶撞击风险	B6 桥梁所处区域位置	B7 地质灾害风险	B8 洪水影响	B9 风、冰雪等自然天气影响	单层相对权重
B1 桥梁附近危险源数量	0.031	0.017	0.038	0.017	0.016	0.047	0.046	0.055	0.037	0.031
B2 周围第三方施工影响	0.092	0.050	0.048	0.029	0.027	0.079	0.070	0.055	0.037	0.050
B3 超载超限	0.154	0.200	0.192	0.172	0.165	0.119	0.279	0.218	0.293	0.192
B4 车辆撞击风险	0.154	0.150	0.096	0.086	0.082	0.119	0.070	0.055	0.037	0.086
B5 船舶撞击风险	0.154	0.150	0.096	0.086	0.082	0.119	0.046	0.055	0.037	0.082
B6 桥梁所处区域位置	0.154	0.150	0.384	0.172	0.165	0.237	0.418	0.328	0.293	0.237
B7 地质灾害风险	0.092	0.100	0.096	0.172	0.247	0.079	0.139	0.218	0.220	0.139
B8 洪水影响	0.061	0.100	0.096	0.172	0.165	0.079	0.070	0.109	0.220	0.109
B9 风、冰雪等自然天气影响	0.061	0.100	0.048	0.172	0.165	0.059	0.046	0.036	0.073	0.073

表9 管理因素判断矩阵及权重

	C1 养护管理	C2 交通管理	C3 应急管理	单层相对权重
C1 养护管理	0.540	0.490	0.594	0.540
C2 交通管理	0.180	0.163	0.148	0.163
C3 应急管理	0.270	0.327	0.297	0.297

其中,最大特征值 $\lambda_{\max}=5.288$, $CI=0.072$,由此得到 $CR=0.064<0.1$,满足判定要求,故通过一致性检验。

其中,最大特征值 $\lambda_{\max}=9.836$, $CI=0.105$,由此得到 $CR=0.072<0.1$,满足判定要求,故通过一致性检验。

其中,最大特征值 $\lambda_{\max}=3.009$, $CI=0.005$,由此得到 $CR=0.009<0.1$,通过一致性检验。

2.2.3 层次总排序

基于上述所计算出的一级指标及二级指标权重,经过系统整合与分析,得到各二级指标相对于目标层的权重,具体数值详如表10所示。

2.2.4 桥梁运营期安全风险评估汇总

根据二级指标的标度及权重层层计算得到最终评估后标度,并将其换算得分及安全等级,综合安全状况评估结果汇总如表11所示。

安全风险控制建议:经评估,该桥梁的综合安全状况等级为二级,运营安全状况良好,当前状态对桥梁的安全运行暂无影响。基于此,建议采取预防性维护以及实时监测等措施,从而进一步提升桥梁的运营安全性。

3 结 语

应用层次分析法,评估桥梁运营期安全风险。构建了以桥梁自身因素、外界环境因素、管理因素3个一级指标以及17个二级指标的桥梁运营期安全风险评估指标体系,结合实际工程案例,给出了桥梁运营期安全风险评估的具体流程,得出以下结论。

(1)提出桥梁运营期安全风险评估方法,经某桥

表 10 二级指标相对目标层权重					
指标因素	桥梁自身因素 A	外界环境因素 B	管理因素 C	权重	总排序
桥梁结构影响 A1	0.055			0.036	9
桥梁规模 A2	0.086			0.055	5
桥梁在役年限 A3	0.146			0.094	3
桥梁加固改造情况 A4	0.272			0.175	2
桥梁技术状况等级 A5	0.441			0.283	1
桥梁附近危险源数量 B1		0.031		0.007	17
周围第三方施工影响 B2		0.050		0.011	16
超载超限 B3		0.192		0.043	7
车辆撞击风险 B4		0.086		0.019	13
船舶撞击风险 B5		0.082		0.019	14
桥梁所处区域位置 B6		0.237		0.054	6
地质灾害风险 B7		0.139		0.031	10
洪水影响 B8		0.109		0.025	11
风、冰雪等自然天气影响 B9		0.073		0.017	15
养护管理 C1			0.540	0.074	4
交通管理 C2			0.163	0.022	12
应急管理 C3			0.297	0.041	8

梁工程实践验证是可行的,可为桥梁运营管理提供新思路。

(2)建议基于评估结果,制定针对高风险桥梁的定期监测计划,并合理分配桥梁维护资源,将更多资源投入到权重占比较大的指标上。

(3)目前,关于桥梁运营安全风险评估的标准或指南暂缺,采用层次分析法构建的风险评估指标体系可为行业制定统一、科学的桥梁运营期安全风险评估标准提供参考。

参考文献:

[1] 许树柏.层次分析法原理[M].天津:天津大学出版社,1988.

[2] Peng K, Catbas N F, Wang Q. Safety risk assessment of Jiangshun Suspension Bridge in design stage[J]. The IES Journal Part A: Civil Structural Engineering,2014,7(1):11-19.

[3] 刘沐宇,段含露.基于证据理论的大跨径悬索桥主塔施工风险分析[J].武汉理工大学学报,2018,40(07):51-59.

[4] 张源,季孟晨,王玉柱,等.桥梁运营期间风险评估研究进展分析[J].工程技术研究,2024,9(13):117-120.

[5] 刘健.基于模糊 AHP-DEMATEL 的城市桥梁运营期安全风险评估研究[D].合肥:安徽建筑大学,2024.

[6] 付明,谭琼,袁宏永,等.城市生命线工程运行监测标准体系构建[J].中国安全科学学报,2021,31(01):153-158.

[7] 廖国威,洪泽水,梅前前,等.基于层次分析法的斜拉桥安全风险评

表 11 桥梁综合安全状况评估汇总							
目标层	评估结果	一级指标	权重	标度	二级指标	权重	标度
桥梁运营期安全风险 评估	评估后 标度: 1.784 换算 得分: 80.397 安全 等级: 二级	桥梁自身因素 A	0.654	1.914	桥梁结构影响 A1	0.055	2
					桥梁规模 A2	0.086	1
					桥梁在役年限 A3	0.146	2
					桥梁加固改造情况 A4	0.272	2
					桥梁技术状况等级 A5	0.441	2
					桥梁附近危险源数量 B1	0.031	1
					周围第三方施工影响 B2	0.050	1
					超载超限 B3	0.192	2
					车辆撞击风险 B4	0.086	2
		外界环境因素 B	0.216	1.862	船舶撞击风险 B5	0.082	1
					桥梁所处区域位置 B6	0.237	3
					地质灾害风险 B7	0.139	1
					洪水影响 B8	0.109	2
					风、冰雪等自然天气影响 B9	0.073	1
					养护管理 C1	0.540	1
		管理因素 C	0.130	1	交通管理 C2	0.163	1
					应急管理 C3	0.297	1

估研究[J]. 交通节能与环保,2024,20(增刊 2):116-122.

[8] 黄祖慰,余颜江,李东晋,等.一种新型在役桥梁风险评估方法[J]. 公路交通技术,2024,40(05):150-157.

[9] 张晓敏.基于群组 AHP 法的桥梁设计安全风险评估[J]. 数学的实践与认识,2022,52(10):55-63.

[10] 交通土建工程安全风险评估与控制[M]. 厦门:厦门大学出版社,2022.

[11] 曹廷,章世祥,朱森林.江苏省在役桥梁运营期安全风险多域源递进综合评价[J]. 工程技术研究,2021,6(19):28-30.