

基于网络分析法的公路桥梁 施工安全风险评价研究

袁剑波¹, 崔 钢¹, 符秋生², 余卫民²

(1. 长沙理工大学, 湖南 长沙 410076, 2. 广东省高速公路有限公司, 广东 广州 510100)

摘 要:针对公路桥梁施工技术与管理特点,构建了公路桥梁施工安全风险的评价指标体系,该体系包括风险要素层和风险因素层两个层次,各要素之间的影响呈网络结构。在此基础上,运用网络分析法理论,建立了公路桥梁施工安全风险评价模型与方法,并结合广清高速改扩建工程新华高架桥施工案例,运用模糊综合评判方法,阐述了该方法的应用,计算了其施工安全风险等级,可为风险管理提供依据,得出的结论符合工程客观实际。

关键词:公路桥梁;网络分析法;安全风险评价;权重排序

DOI:10.6049/kjbydc.DC20140323

中图分类号:U445

文献标识码:A

文章编号:1001-7348(2014)11-0096-04

0 引言

公路桥梁工程具有桥型结构多样、施工技术复杂、施工环境恶劣多变、参与单位和人员众多的特点,同时桥梁施工还会与现有道路、水运交通相互影响。因此,公路桥梁施工过程中蕴含着大量的安全风险,导致安全事故频发,造成严重的人员伤亡和经济损失。因而有必要开展公路桥梁施工安全风险评价研究,认识施工过程中存在的安全风险因素及它们的内在联系,并对其进行量化分析,确定安全风险等级,进而采取应对措施以降低风险。

传统的桥梁施工安全风险评价方法主要采用层次分析法(AHP)或模糊层次分析法(FAHP)。运用层次分析法建模和分析问题时,假定其评价指标是独立的递阶层次关系,即指标之间相互独立,而且各层次之间存在自上而下的支配关系。但是在桥梁工程施工中,实际存在的安全风险因素往往是相互联系、相互影响的,各安全风险因素所构成的并不是递阶层次结构,而是网络循环结构。因而有必要运用网络分析法(ANP)建立桥梁施工安全风险评价模型和方法。

1 基于网络分析法的公路桥梁施工安全风险评价指标体系

网络分析法,即 ANP(The Analytic Network

Process),是由 T·L·Saaty 教授在层次分析法(AHP)的基础上提出来的^[1]。ANP 的网络结构与 AHP 相比具有更大的灵活性。ANP 处理问题时既考虑到同一元素集内各元素之间的相互影响,即内部依存性;又考虑到不同元素集之间的相互影响,即外部依存性。对于这两种依存关系,ANP 侧重于准则、元素集、元素之间的相互影响关系,而不仅仅是自上而下的支配关系。这样就避免了 AHP 在建立递阶层次结构时的假设条件,更符合实际情况^[2]。

在公路桥梁工程实践中,影响施工安全的风险因素形成了一个复杂的体系,这些风险因素之间,既有层次性,又有关联性,而同一层次的风险因素之间又会相互影响,这样就构成了网络循环结构。

根据网络分析法的原理,结合公路桥梁工程的特点,建立基于 ANP 的公路桥梁施工安全风险评价指标体系(见图 1、表 1)。该指标体系分为目标层、要素层、因素层 3 个层次。在目标层中,安全风险既是目标,又是唯一的评价准则。在要素层中,考虑将勘察设计类风险、施工技术类风险、人员材料机械类风险、组织管理类风险、环境条件类风险和交通类风险等 6 类风险作为风险要素,这 6 类风险要素相互影响、相互关联。例如,通过勘测设计所确定的桥型结构会影响其施工方案和施工技术的复杂性进而带来施工风险,同时也会影响到施工中的交通组织、施工人员安排、建筑材料

收稿日期:2014-03-31

作者简介:袁剑波(1964—),男,湖南益阳人,博士,长沙理工大学教授,研究方向为道路经济与管理;崔钢(1987—),男,河南信阳人,长沙理工大学硕士研究生,研究方向为工程项目管理;符秋生(1965—),男,广东湛江人,广东省高速公路有限公司高级工程师,研究方向为工程项目管理;余卫民(1975—),男,湖南常德人,广东省高速公路有限公司高级工程师,研究方向为工程项目管理。

选择、机械设备配置以及施工组织管理等。因此, 上述风险要素间的相互关系呈网络结构。

上述 6 类风险要素内部可细化为若干个风险影响因素, 见表 1。

表 1 安全风险影响因素

目标层	要素层	因素层	目标层	要素层	因素层	
公路桥梁施工安全风险 R	勘察设计类风险 R ₁	勘测不足、预测误差 R _{1.1}	公路桥梁施工安全风险 R	人材机类风险 R ₃	机械性能不稳定 R _{3.8}	
		设计文件质量不符合要求 R _{1.2}			人机配合问题 R _{3.9}	
		设计与施工相脱离 R _{1.3}			安全组织机构不健全 R _{4.1}	
		设计理论不成熟 R _{1.4}		各部门之间不协调 R _{4.2}		
		设计变更导致的问题 R _{1.5}		安防措施不完善 R _{4.3}		
	施工工艺不成熟 R _{2.1}	应急救援措施不完善 R _{4.4}				
	施工技术类风险 R ₂	施工质量控制不合格 R _{2.2}	防火防灾设备不完善 R _{4.5}	组织管理类风险 R ₄	安全教育未落实 R _{4.6}	
		施工方案不合理 R _{2.3}	地质条件不良 R _{5.1}			
		违反施工规范 R _{2.4}	气候条件不良 R _{5.2}			
		工人及管理人员素质 R _{3.1}	地质地貌条件不利 R _{5.3}			
	人材机类风险 R ₃	建材质量不合格 R _{3.2}	桥位特征复杂 R _{5.4}		环境条件类风险 R ₅	供水供电不稳 R _{5.5}
		特殊材料使用问题 R _{3.3}	附近民房厂房情况 R _{5.6}			
		机械设备类型不配套 R _{3.4}	道路交通状况 R _{6.1}			
		机械和动力故障 R _{3.5}	现场工程车辆交通状况 R _{6.2}	交通类风险 R ₆		
		机械安装调试失误 R _{3.6}				
		机械维修保养不当 R _{3.7}				

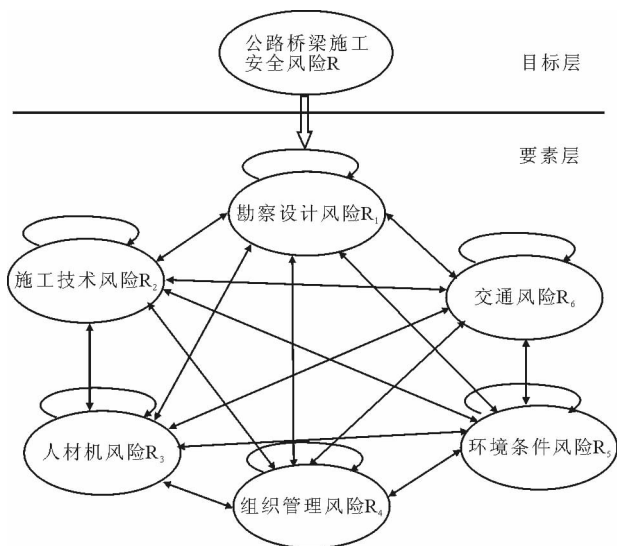


图 1 基于 ANP 的公路桥梁施工安全风险要素网络模型

$$W = \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} & W_{13} & W_{14} & W_{15} & W_{16} \\ W_{21} & W_{22} & W_{23} & W_{24} & W_{25} & W_{26} \\ W_{31} & W_{32} & W_{33} & W_{34} & W_{35} & W_{36} \\ W_{41} & W_{42} & W_{43} & W_{44} & W_{45} & W_{46} \\ W_{51} & W_{52} & W_{53} & W_{54} & W_{55} & W_{56} \\ W_{61} & W_{62} & W_{63} & W_{64} & W_{65} & W_{66} \end{bmatrix}$$

在相互影响矩阵中, 共有 6×6 个子矩阵, 每个子矩阵都代表相应的两类安全风险因素的单向影响关系, 例如, W_{12} 代表勘察设计类风险 (R_1) 对施工技术类风险 (R_2) 的影响 (而 W_{21} 代表施工技术类风险 (R_2) 对勘察设计类风险 (R_1) 的反作用^[4]); 子矩阵 W_{12} 有 4 个列向量, 分别是 $\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4$; 子矩阵 W_{12} 的第一列 η_1 表示勘察设计类的所有风险因素 ($R_{1.1}, R_{1.2}, R_{1.3}, R_{1.4}, R_{1.5}$) 对于施工技术类的风险因素“施工工艺不成熟” ($R_{2.1}$) 的影响程度权重排序, 其余 3 列 η_2, η_3, η_4 也表示相应的权重排序。

2 基于网络分析法的公路桥梁施工安全风险评价方法

2.1 公路桥梁施工安全风险因素的相互影响矩阵构建

基于网络分析法, 上述 6 类桥梁施工安全风险要素间的相互影响可用相互影响矩阵来表示。影响大小的标度在 0—1 之间, 0 代表前者对后者无影响, 1 代表前者占有对后者的全部影响^[3]。

各权重排序向量 ($\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4$) 通过建立比较判断矩阵来计算, 在进行比较判断的时候, 邀请风险分析专家, 结合项目实际情况进行评分。例如对 η_1 的计算中, 以施工技术类的风险因素 $R_{2.1}$ 为次准则, 比较勘察设计类任意两个风险因素对于 $R_{2.1}$ 影响程度的大小, 使用 1—9 标度法赋予分值, 进而建立比较判断矩阵 A_1 , 然后计算出矩阵 A_1 的归一化特征向量, 此向量就是 η_1 。

表 2 比较判断矩阵 A_1

[2.1 施工工艺不成熟 R _{2.1}] → 1 组	1.1 勘测不足、预测误差	1.2 设计文件质量不符合要求	1.3 设计与施工相脱离	1.4 设计理论不成熟	1.5 设计变更导致的问题
1.1 勘测不足、预测误差					
1.2 设计文件质量不符合要求					
1.3 设计与施工相脱离					
1.4 设计理论不成熟					
1.5 设计变更导致的问题					

2.2 公路桥梁施工安全风险因素的权重排序计算

根据相互影响矩阵 W ，可以计算出公路桥梁施工安全风险因素的权重排序，步骤如下：

(1)对相互影响矩阵 W 进行加权。相互影响矩阵 W 的每个子矩阵，都是列归一化的，但是其自身却不是列归一化的，为了方便计算，要对其进行加权。

将 6 个风险要素之间的相互影响作用进行比较判断，得到 6 个比较判断矩阵，算出它们的归一化特征向量，组合成一个权矩阵 D 。

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \\ d_{41} & d_{42} & d_{43} & d_{44} & d_{45} & d_{46} \\ d_{51} & d_{52} & d_{53} & d_{54} & d_{55} & d_{56} \\ d_{61} & d_{62} & d_{63} & d_{64} & d_{65} & d_{66} \end{bmatrix}$$

利用权矩阵 D 给影响矩阵 W 加权，得到加权影响矩阵 \bar{W} 。

$$\bar{W} = (d_{ij} W_{ij}) = \begin{bmatrix} d_{11}W_{11} & d_{12}W_{12} & d_{13}W_{13} & d_{14}W_{14} & d_{15}W_{15} & d_{16}W_{16} \\ d_{21}W_{21} & d_{22}W_{22} & d_{23}W_{23} & d_{24}W_{24} & d_{25}W_{25} & d_{26}W_{26} \\ d_{31}W_{31} & d_{32}W_{32} & d_{33}W_{33} & d_{34}W_{34} & d_{35}W_{35} & d_{36}W_{36} \\ d_{41}W_{41} & d_{42}W_{42} & d_{43}W_{43} & d_{44}W_{44} & d_{45}W_{45} & d_{46}W_{46} \\ d_{51}W_{51} & d_{52}W_{52} & d_{53}W_{53} & d_{54}W_{54} & d_{55}W_{55} & d_{56}W_{56} \\ d_{61}W_{61} & d_{62}W_{62} & d_{63}W_{63} & d_{64}W_{64} & d_{65}W_{65} & d_{66}W_{66} \end{bmatrix} \quad (1)$$

(2)计算权重排序。加权影响矩阵 \bar{W} 的列向量代表安全风险因素的初始权重排序，设为 $Z^{(0)}$ ，对其进行

极限运算：

$$Z^\infty = \bar{W}^\infty Z^{(0)} = \lim_{k \rightarrow \infty} \bar{W}^k Z^{(0)} \quad (2)$$

公式(2)的含义是，将加权影响矩阵 \bar{W} 进行 k 次自乘，当极限 $\lim_{k \rightarrow \infty} \bar{W}^k$ 存在时，将此极限与 $Z^{(0)}$ 相乘，这样就得到了安全风险因素的最终权重排序 Z^∞ 。

3 案例分析

3.1 工程概况

新华高架桥属于广清高速公路改扩建工程的一部分。根据施工图设计，将旧桥拆除后，改建为双向八车道高架桥，全长 1 006m，设计行车速度 100km/h。本工程存在以下施工难点：①地质条件不良，岩溶是本项目区域内主要的不良地质，大多数桩位下面都存在溶洞；②气候条件恶劣，主要表现为雨量充沛，影响施工；③施工技术复杂，采用了旋挖成孔灌注桩、支架现浇法、架桥机施工法等多种复杂的工艺；④管理难度大，参与建设的单位众多，工人素质不一；⑤施工与交通相互干扰，由于是改扩建工程，在施工过程中还要保持既有交通的通畅，现场施工与道路交通经常相互干扰。

3.2 ANP 模型建立

根据新华高架桥工程的特点，建立新华高架桥施工安全风险评价的 ANP 模型(见图 1)。邀请专家结合新华高架桥的实际情况进行分析，确定了每个风险要素中所包含的风险因素(见表 3)。

表 3 新华高架桥二级安全风险影响因素

目标层	要素层	因素层	目标层	要素层	因素层
安全风险 R	勘察设计风险 R_1	勘测不足、预测误差 $R_{1.1}$	安全风险 R	组织管理风险 R_4	安全组织机构不健全 $R_{4.1}$
		设计文件质量不要求 $R_{1.2}$			安防措施不完善 $R_{4.2}$
		施工工艺不成熟 $R_{2.1}$			安全教育未落实 $R_{4.3}$
	施工技术风险 R_2	施工质量控制不合格 $R_{2.2}$		环境条件风险 R_5	地质条件不良 $R_{5.1}$
		违反施工规范 $R_{2.3}$			气候条件不良 $R_{5.2}$
		工人及管理人员素质 $R_{3.1}$			供水供电不稳 $R_{5.3}$
	人材机风险 R_3	建材质量不合格 $R_{3.2}$		交通风险 R_6	道路交通状况 $R_{6.1}$
		机械和动力故障 $R_{3.3}$			现场工程车辆交通状况 $R_{6.2}$

3.3 ANP 模型计算

以施工安全风险为准则，以某个安全风险因素为次准则，依次对各类安全风险因素进行两两比较判断。开展这项工作时，采用专家调查法，邀请风险分析专家对新华高架桥工程各类安全风险因素进行两两比较并打分判断，分值采取 1—9 标度法。根据专家打分判断结果建立各比较判断矩阵，并计算各比较判断矩阵的归一化特征向量^[4]。

例如，以风险因素 $R_{3.3}$ “施工机械和动力故障”为次准则，比较环境类 3 个风险因素 $R_{5.1}$ 、 $R_{5.2}$ 、 $R_{5.3}$ 对次准则的影响程度大小。经过专家打分判断，建立比较判断矩阵见表 4。

表 4 比较判断矩阵

[3.3]→5 组	[5.1 地质条件不良]	[5.2 气候条件不良]	[5.3 供水供电不稳定]
[5.1 地质条件不良]	1	2	3
[5.2 气候条件不良]	1/2	1	3
[5.3 供水供电不稳定]	1/3	1/3	1

计算出这个比较判断矩阵的归一化特征向量为 $(0.527\ 836\ 0.332\ 516\ 0.139\ 648)^T$ ，该矩阵的一致性系数为 $CR=0.051\ 6 \leq 0.1$ ，满足一致性检验。

通过上述方法，得出所有比较判断矩阵之后，建立 ANP 模型的相互影响矩阵 W ，根据公式(1)，计算出加权影响矩阵 \bar{W} ，根据公式(2)，计算出新华高架桥施工过程中各安全风险因素的权重排序，见表 5。

W =	1	0.333 3	0.333 3	0.240 3	0	0.25	0	0	1	0.25	1	0	0	0	0.333 3	0.240 3
	0	0.666 7	0	0.209 8	0.333 3	0.25	0	0	0	0.25	0	0	0	0	0	0.209 8
	0	0	0.666 7	0.549 9	0.666 7	0.5	0	0	0	0.5	0	0	0	0	0.666 7	0.549 9
	0.160 3	0.131 1	0.148 8	0.191 9	0.142 9	0.148 8	0	0.148 8	0	0.174 3	0	0	0	0.166 7	0.191 9	0.136 5
	0.690 8	0.660 8	0.690 8	0.633 7	0.714 3	0.690 8	0	0.690 8	0	0.633 7	0	0	0	0.666 7	0.633 7	0.625
	0.148 8	0.208 1	0.160 3	0.174 4	0.142 9	0.160 3	0	0.160 3	1	0.191 9	1	0	0	0.166 7	0.174 4	0.238 5
	0	0.666 7	0.666 7	0.666 7	0.666 7	0.666 7	1	0.5	0	0.666 7	0	0.75	0.75	0.666 7	0.666 7	0.75
	0	0.333 3	0.333 3	0.333 3	0.333 3	0.333 3	0	0.5	0	0.333 3	0	0.25	0.25	0.333 3	0.333 3	0.25
	0.8	0.423 4	0.454 5	0.423 4	0.5	0.344 5	0	0	0.559 1	0.423 4	0.416 1	0	0	0	0.423 4	0.454 5
	0	0.484 2	0.454 5	0.484 2	0.5	0.546 9	0	0	0.352 2	0.484 2	0.457 9	0	0	0	0.484 2	0.454 5
W =	0.2	0.092 4	0.090 9	0.092 4	0	0.108 5	0	0	0.088 7	0.092 4	0.126	0	0	0	0.092 4	0.090 9
	0.539 6	0.539 6	0.527 8	0.443 3	0.474 2	0.539 6	0.457 9	0.333 3	0.539 6	0.443 3	0.539 6	0.75	0.333 3	0.4	0.539 6	0.539 6
	0.297	0.297	0.332 5	0.387 5	0.376 4	0.297	0.416 1	0.333 3	0.297	0.387 5	0.297	0.25	0.666 7	0.4	0.297	0.297
	0.163 4	0.163 4	0.139 6	0.169 2	0.149 4	0.163 4	0.126	0.333 3	0.164 3	0.169 2	0.164 3	0	0	0.2	0.164 3	0.164 3
	0.5	0	0.5	0.5	0.5	0.333 3	1	1	0.5	0.5	0.5	0.666 7	0.666 7	0.5	0.666 7	0.333 3
	0.5	0	0.5	0.5	0.5	0.666 7	0	0	0.5	0.5	0.5	0.333 3	0.333 3	0.5	0.333 3	0.666 7
	0.180 8	0.055 2	0.052 4	0.027 3	0	0.028 4	0	0	0.150 7	0.032 4	0.150 7	0	0	0	0.033	0.023 8
	0	0.110 4	0	0.023 8	0.037 8	0.028 4	0	0	0	0.032 4	0	0	0	0	0	0.020 8
	0	0	0.104 8	0.062 4	0.075 6	0.056 7	0	0	0	0.064 9	0	0	0	0	0.066 1	0.054 5
	0.027 5	0.020 6	0.022 2	0.037 6	0.028	0.029 2	0	0.033 9	0	0.022 6	0	0	0	0.049 9	0.025 1	0.017 9
W =	0.118 3	0.103 7	0.102 8	0.124 1	0.139 9	0.135 3	0	0.157 4	0	0.082 2	0	0	0	0.199 7	0.082 9	0.081 8
	0.025 5	0.032 7	0.023 9	0.034 2	0.028	0.031 4	0	0.036 5	0.150 7	0.024 9	0.150 7	0	0	0.049 9	0.022 8	0.031 2
	0	0.091 8	0.087 1	0.104 6	0.104 6	0.104 6	0.318	0.122 8	0	0.092 6	0	0.320 7	0.320 7	0.199 7	0.098 1	0.110 4
	0	0.045 9	0.043 5	0.052 3	0.052 3	0.052 3	0	0.122 8	0	0.046 3	0	0.106 9	0.106 9	0.099 8	0.049 1	0.036 8
	0.244 9	0.118 8	0.121	0.108 3	0.127 9	0.088 1	0	0	0.180 4	0.117 6	0.134 3	0	0	0	0.110 8	0.119
	0	0.135 8	0.121	0.123 8	0.127 9	0.139 9	0	0	0.113 6	0.134 5	0.147 7	0	0	0	0.126 8	0.119
	0.061 2	0.025 9	0.024 2	0.023 6	0	0.027 7	0	0	0.028 6	0.025 7	0.040 7	0	0	0	0.024 2	0.023 8
	0.152 7	0.139 9	0.129 9	0.100 8	0.107 8	0.122 7	0.270 3	0.151 9	0.168 4	0.119 1	0.168 4	0.356 6	0.158 5	0.133 2	0.156 4	0.156 4
	0.084 0	0.077	0.081 8	0.088 1	0.085 6	0.067 5	0.245 6	0.151 9	0.092 7	0.104 1	0.092 7	0.118 9	0.317	0.133 2	0.086 1	0.086 1
	0.046 2	0.042 4	0.034 4	0.038 5	0.034	0.037 2	0.074 4	0.151 9	0.051	0.045 5	0.051	0	0	0.066 6	0.047 4	0.047 4
0.029 4	0	0.025 6	0.025 3	0.025 3	0.016 9	0.091 8	0.070 9	0.031 9	0.027 5	0.031 9	0.064 7	0.064 7	0.034	0.047 5	0.023 7	
0.029 4	0	0.025 6	0.025 3	0.025 3	0.033 8	0	0	0.031 9	0.027 5	0.031 9	0.032 3	0.032 3	0.034	0.023 7	0.047 5	

表 5 安全风险因素归一化权重排序

安全风险因素	权重	安全风险因素	权重	安全风险因素	权重	安全风险因素	权重
1.1 勘测不足预测误差	0.242 457	2.3 违法施工规范	0.015 752	4.1 安全生产组织机构不健全	0.032 435	5.2 气候条件异常	0.180 306
1.2 设计文件质量不合要求	0.064 653	3.1 工人及管理人员素质	0.013 319	4.2 安防措施不完善	0.029 609	5.3 供水供电不稳定场地不良	0.041 423
2.1 施工工艺不成熟	0.009 553	3.2 建材质量不合格	0.004 044	4.3 安全生产教育未落实	0.005 842	6.1 道路交通状况	0.062 117
2.2 施工质量控制不合格	0.040 059	3.3 机械和动力故障	0.013 091	5.1 地质条件不良	0.223 817	6.2 现场工程车辆交通状况	0.021 522

3.4 安全风险等级确定

依据交通运输部颁发的《公路桥梁和隧道工程施工安全风险评估指南》，将分项工程的安全风险等级分为低度(I级)、中度(II级)、高度(III级)、极高(IV级)4个级别，建立评语集 $V = \{\text{低度}, \text{中度}, \text{高度}, \text{极高}\}$ 。

$$R = \begin{bmatrix} 0 & 0.9 & 0.45 & 0.05 & 0 & 0 & 0 & 0.8 & 0 & 0.05 & 0.8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.75 & 0.1 & 0.55 & 0.3 & 0.4 & 0.4 & 0.25 & 0.2 & 0.75 & 0.75 & 0.2 & 0.1 & 0.3 & 0.3 & 0.5 & 0.25 & 0.25 \\ 0.25 & 0 & 0 & 0.65 & 0.6 & 0.5 & 0.75 & 0 & 0.25 & 0.2 & 0 & 0.9 & 0.7 & 0.7 & 0.5 & 0.75 & 0.75 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

将使用 ANP 模型计算出的安全风险因素权重排序向量 P 与单因素评判矩阵 R 相乘，即可得到模糊综合评判结果 B:

$$B = P \times R = (0.068 1 \quad 0.289 6 \quad 0.640 7 \quad 0.001 6)$$

B 中最大值为 0.640 7。根据最大隶属度原则，其

为了客观确定新华高架桥的施工安全风险等级，特邀请施工方、设计方、监理方的技术专家共 20 位，以问卷形式开展调查，请他们单独从每个安全风险因素出发，评价其安全重要程度^[5]。根据评价结果，得出单因素评价矩阵 R:

对应的安全风险等级为高度(III级)。因此，评价新华高架桥施工安全风险等级为高度(III级)。

根据上述安全风险评价结论，新华高架桥的建设单位采取了一系列风险应对措施:与设计单位协商，变更了部分设计方案;购买了相关工程保险;与施工单