

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2024.01.011

https://xuebao.xaut.edu.cn

引文格式:付鸿鑫,徐颖,程琳,倪苏黔,丁进甫.基于熵值-G2法改进LEC法的地铁施工安全评价[J].西安理工大学学报,2024,40(1):111-120.

FU Hongxin, XU Ying, CHENG Lin, NI Suqian, DING Jinfu. Safety evaluation of metro construction by the entropy-G2 method to improve the LEC method[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2024, 40(1): 111-120.

## 基于熵值-G2法改进LEC法的地铁施工安全评价

付鸿鑫<sup>1</sup>, 徐颖<sup>2</sup>, 程琳<sup>1</sup>, 倪苏黔<sup>1</sup>, 丁进甫<sup>1</sup>

(1. 安徽理工大学 土木建筑学院, 安徽 淮南 232001;

2. 深部煤矿采动响应与灾害防控国家重点实验室, 安徽 淮南 232001)

**摘要:** 为了更加准确便捷地得到地铁盾构安全评价结果,本文提出了一种改进的LEC评价模型。首先采用WBS-RBS法建立起风险清单,并组建专家组进行评估。随后利用专家数据的熵值大小确定出各专家的重要程度比值,建立起引入熵值概念的G2赋权法对专家进行赋权,修正专家组的评价结果。该评价方法既克服了传统LEC法较为主观的局限性,又解决了组合赋权法中的系数分配难题,同时真实地反映了现实因素和数据自身包含的信息。最后结合实际工程得到了风险清单的评价结果,并提出应对措施。

**关键词:** LEC法; 熵权法; G2法; 安全评价

中图分类号: U231; X928.9

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2024)01-0111-10

### Safety evaluation of metro construction by the entropy-G2 method to improve the LEC method

FU Hongxin<sup>1</sup>, XU Ying<sup>2</sup>, CHENG Lin<sup>1</sup>, NI Suqian<sup>1</sup>, DING Jinfu<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. State Key Laboratory of Mining Response and Disaster Prevention and Control in Deep Coal Mines, Huainan 232001, China)

**Abstract:** In order to more accurately and conveniently obtain the underground shield safety evaluation results, an improved LEC evaluation model is proposed in this paper. Firstly, the WBS-RBS method is used to establish a risk list, and an expert group is formed to carry out the evaluation. Subsequently, the entropy value of the expert data is used to determine the importance ratio of each expert; the G2 assignment method, which introduces the concept of entropy value, is established to assign weights to the experts and amend the evaluation results of the expert group. This evaluation method not only overcomes the limitations of the traditional LEC method which is more subjective, but also solves the problem of coefficient allocation in the combined assignment method, truly reflecting the realistic factors and the information contained in the data itself. Finally, the evaluation results of the risk list are obtained in conjunction with the actual project, with countermeasures proposed.

**Key words:** LEC method; entropy method; G2 method; safety assessment

收稿日期: 2023-05-19; 网络首发日期: 2023-11-03

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20231103.1001.002.html>

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2021YFB3401504)

第一作者: 付鸿鑫,男,硕士生,研究方向为地下工程安全评价。E-mail: 313026361@qq.com

通信作者: 徐颖,男,博士,教授,研究方向为隧道及地下工程施工技术、爆破理论和技术等。E-mail: yxu@aust.edu.cn

由于城市地铁建设周期长,潜在的安全风险因素多,风险来源庞杂,且地铁施工安全管理难度大<sup>[1]</sup>,因此时有发生施工安全事故,造成了相当大的损失。由此可见,对地铁施工的安全风险因素和施工安全评价的研究十分有必要。

目前,国内外的学者对地铁盾构施工的安全评价做出了大量的研究。陈辉华等<sup>[2]</sup>通过系统工程法识别出主要风险因素,使用 DEMATEL-ISM 方法建立起地铁盾构掘进安全事故致因模型。于文龙等<sup>[3]</sup>基于 WSR 系统方法建立地铁施工安全评价指标,通过可拓学评价方法建立起地铁施工安全评价模型。闫文周等<sup>[4]</sup>采用相互作用矩阵法,构建基于多因素耦合作用下的地铁施工风险评价模型。Li 等<sup>[5]</sup>基于 BIM 提出了地铁建设的安全风险识别系统(SRIS)和预警系统(SREWS)。Liu 等<sup>[6]</sup>采用 SPA 法对地铁隧道施工安全进行评价,建立了基于多元联动数和集合对分析理论的地铁隧道施工安全评价模型。Wang 等<sup>[7]</sup>提出了一种基于模糊综合贝叶斯网络的地铁建设安全风险决策法。Hou 等<sup>[8]</sup>提出了结合 credal 网络(CNs)和基于平均解决方案距离(EDAS)法的改进风险评价模型。综上所述,目前学者们采用了多种评价方法建立起不同评价模型,对施工安全风险进行了评价。但对于风险清单的建立缺乏全面性,未系统反映出盾构各环节潜在安全隐患的相互作用关系,而评价方法条理性

较弱,不易理解,对事故发生可能性、来源和后果讨论不多。

基于此,本文提出一种条理清晰、易于理解的改进的 LEC(作业条件危险性评价法)评价模型。首先将 4M1E 法与工作-风险分解结构法(WBS-RBS)结合,构建风险识别矩阵,列出风险清单,然后将熵值修正 G2 赋权法融入 LEC 法,从“人”、“机”、“料”、“法”、“环”角度系统地地铁盾构施工各环节进行全面的评估,最后得到各种风险因素的安全等级,并结合评价结果提出地铁盾构施工安全管理建议。

### 1 地铁盾构施工风险因素识别

地铁盾构施工具有许多潜在的安全风险,因此相关的风险因素识别需要具有系统性、全面性。目前有许多风险识别方法,如专家调查法、故障树法、检查表法等,针对地铁施工的特点,本文采用 WBS-RBS 法识别风险。WBS-RBS 法首先将工作、风险分解成若干个子系统,然后构建风险识别矩阵,从而避免风险遗漏,具有全面性、系统性的优点<sup>[9]</sup>。

#### 1.1 WBS 分解

工作分解结构(WBS)是将项目整体逐级划分成若干个更易于管理的子系统,通常通过自上而下进行设计,能层次分明地反映出复杂项目的完整结构<sup>[10]</sup>。对地铁建设进行 WBS 分解,见图 1。

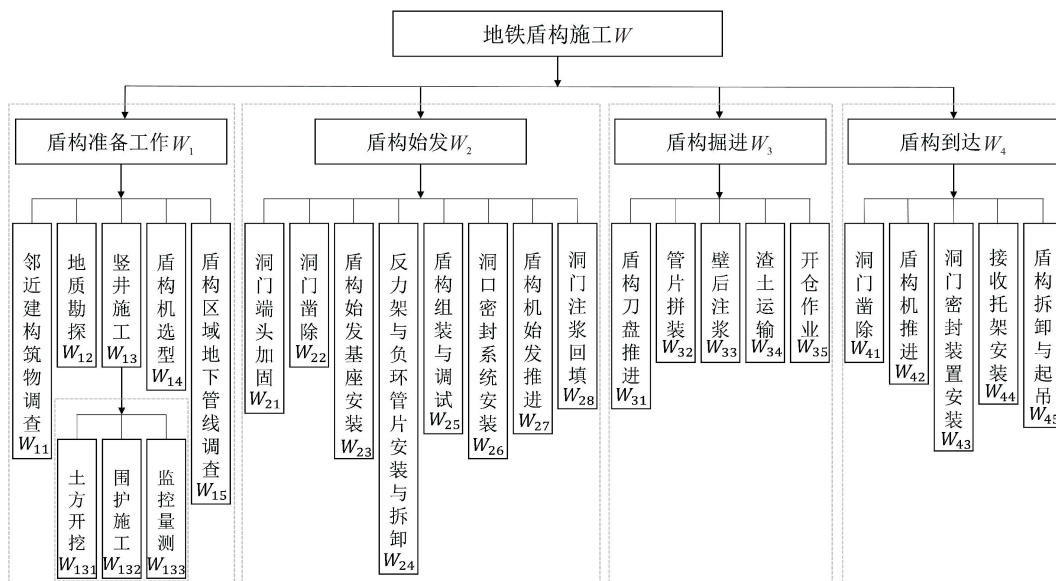


图 1 WBS 分解图

Fig. 1 WBS decomposition diagram

### 1.2 RBS分解

风险分解结构(RBS)是风险的分层表示,将项目的风险逐级分类分解,考虑到在地铁盾构建设中,

涉及到多方面的风险,故使用4M1E法来进行风险分解<sup>[11]</sup>,见图2。

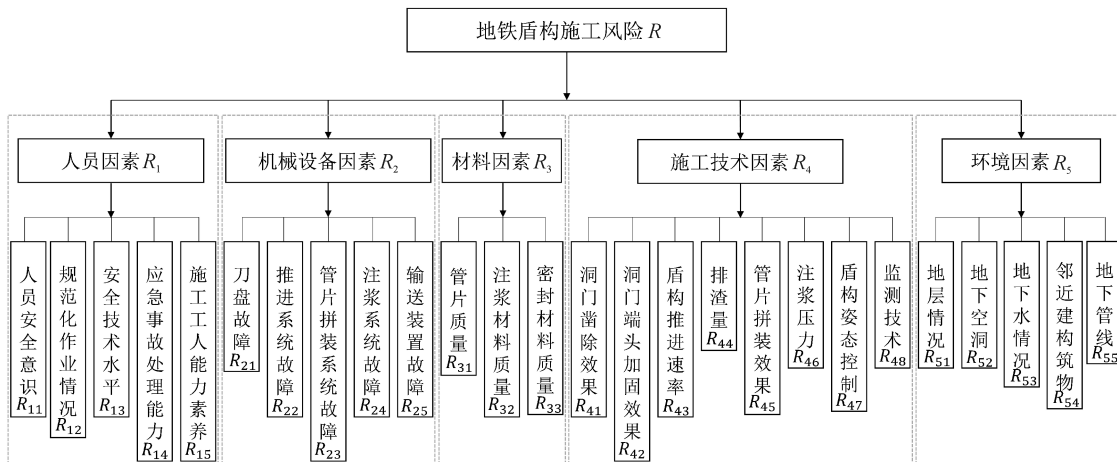


图2 RBS分解图

Fig.2 RBS decomposition diagram

### 1.3 WBS-RBS 风险矩阵

通过WBS、RBS分解,建立WBS-RBS风险识别矩阵。以WBS和RBS的最后一层元素作为矩阵的行和列,对于确实存在和有较大可能会发生的风险因素,矩阵元素为1;对于几乎不可能发生的或者即使发生但对整个工程影响不大的风险因素,矩阵元素为0<sup>[12]</sup>。构建出判断矩阵,见图3。

险因素,矩阵元素为1;对于几乎不可能发生的或者即使发生但对整个工程影响不大的风险因素,矩阵元素为0<sup>[12]</sup>。构建出判断矩阵,见图3。

R	W	W <sub>1</sub>					W <sub>2</sub>								W <sub>3</sub>					W <sub>4</sub>									
		W <sub>11</sub>	W <sub>12</sub>	W <sub>131</sub>	W <sub>132</sub>	W <sub>133</sub>	W <sub>14</sub>	W <sub>15</sub>	W <sub>21</sub>	W <sub>22</sub>	W <sub>23</sub>	W <sub>24</sub>	W <sub>25</sub>	W <sub>26</sub>	W <sub>27</sub>	W <sub>28</sub>	W <sub>31</sub>	W <sub>32</sub>	W <sub>33</sub>	W <sub>34</sub>	W <sub>35</sub>	W <sub>41</sub>	W <sub>42</sub>	W <sub>43</sub>	W <sub>44</sub>	W <sub>45</sub>			
R <sub>1</sub>	R <sub>11</sub>	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1				
	R <sub>12</sub>	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1				
	R <sub>13</sub>	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0			
	R <sub>14</sub>	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1			
	R <sub>15</sub>	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1			
R <sub>2</sub>	R <sub>21</sub>	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0			
	R <sub>22</sub>	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0		
	R <sub>23</sub>	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0		
	R <sub>24</sub>	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0		
	R <sub>25</sub>	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0		
R <sub>3</sub>	R <sub>31</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0		
	R <sub>32</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0		
	R <sub>33</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	
	R <sub>41</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	
R <sub>4</sub>	R <sub>42</sub>	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
	R <sub>43</sub>	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	
	R <sub>44</sub>	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0
	R <sub>45</sub>	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	
	R <sub>46</sub>	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0
	R <sub>47</sub>	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
	R <sub>48</sub>	0	0	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
	R <sub>5</sub>	R <sub>51</sub>	0	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
R <sub>52</sub>		0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	
R <sub>53</sub>		0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	
R <sub>54</sub>		1	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	
R <sub>55</sub>		1	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	

图3 WBS-RBS 风险识别矩阵

Fig.3 WBS-RBS risk identification matrix

通过对WBS-RBS风险识别矩阵识别结果的归纳总结,并查阅相关文献资料<sup>[13-14]</sup>,得到了源自

“人”、“机”、“料”、“法”、“环”五个角度的共计40项风险,见表1。

表 1 地铁盾构施工风险清单  
Tab 1 List of risks in metro shield construction

风险源	风险因素	风险源	风险因素
人员管理因素	工人对安全隐患警惕性低 $A_1$	施工材料因素	管片质量不合格 $C_1$
	工人规范施工落实度低 $A_2$		管片在运输吊装等过程中损坏 $C_2$
	施工员专业技术水平不足 $A_3$		注浆材料不合格 $C_3$
	工人在有潜在危险的环境施工 $A_4$		管片连接螺栓不合格 $C_4$
	紧急逃生系统与安全防护装置故障 $A_5$	环境因素	盾构区间出现地下空洞或回填不密实的地质钻孔 $D_1$
	实时动态监测不准确 $A_6$		未充分调查地下水情况 $D_2$
	施工安全隐患未按要求整改 $A_7$		盾构在软弱地层中掘进 $D_3$
	施工安全检查制度落实度低 $A_8$		盾构在复合地层中掘进 $D_4$
机械设备因素	盾构机刀盘系统故障 $B_1$	对盾构区间邻近建构筑物保护不当 $D_5$	
	盾构机管片拼装系统故障 $B_2$	对盾构区间地下管线保护不当 $D_6$	
	盾构机推进系统故障 $B_3$	施工技术因素	盾构掘进参数设置错误 $E_1$
	盾构机排渣系统故障 $B_4$		盾构掘进轴线控制欠佳 $E_2$
	盾尾密封装置失效 $B_5$		盾构推进速度过快 $E_3$
	电机、风扇周围堵塞 $B_6$		未严格落实实时监测 $E_4$
	注浆系统故障 $B_7$		衬砌效果差 $E_5$
	通风系统故障 $B_8$		注浆效果差 $E_6$
	电器设备故障 $B_9$		端头加固效果差 $E_7$
	监测设备故障 $B_{10}$		地基加固效果差 $E_8$
	盾构机刀具更换作业风险 $B_{11}$		排渣量控制欠佳 $E_9$
	管片运输车脱轨及碰撞 $B_{12}$		管片连接螺栓松动 $E_{10}$

## 2 引入熵值修正 G2 法的 LEC 评价模型

LEC 法由于方法简明,可操作性高,被各行业广泛运用,但该方法具有一定的主观性,因此需要对其进行改进<sup>[15]</sup>。传统的 LEC 法依赖于专家的打分,而不同的专家给出的分值具有无序性,因此本文将熵的概念引入其中。在信息论中,熵和信息分别是系统无序程度和有序程度的度量,根据信息熵的概念,用熵值来判断专家打出的分数集的离散程度。若熵值越小,则离散程度越大,意味着提供的信息量更大,表示该专家打出的分数的影响(即权重)越大,更具有参考价值。而熵值虽然消除了人为的影响,却又过分强调数据之间的内部变化,对实际情况的针对性分析不足,因此,结合 G2 主观赋权,增加评价系统的灵活性,同时熵权法也可有效地消除 G2 法的主观性,减少 G2 法无法反映指标数据客观性的不足,从而避免了单一方法计算权重的缺点。

### 2.1 熵值法与 G2 法

#### 1) 熵值法

熵值法是客观赋权法,具体的计算步骤如下:设  $p_{xj}$  是第  $j$  个评价对象在第  $x$  个评价点上的观测值 ( $1 \leq j \leq m, 1 \leq x \leq n$ ), 则第  $j$  个评价对象的熵值  $e_j$  为:

$$e_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{x=1}^n \frac{p_{xj}}{\sum_{x=1}^n p_{xj}} \ln \frac{p_{xj}}{\sum_{x=1}^n p_{xj}} \quad (1)$$

根据熵值法的概念,熵值越小,数据的信息量越大,不确定性小,对评价所起的作用越大<sup>[16]</sup>。反之,对评价所起到作用越小。故第  $j$  个评价对象的权重为:

$$w_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{x=1}^m (1 - e_x)} \quad (2)$$

#### 2) G2 法

G2 法是一种主观赋权,基本思想如下:首先人



为从评价指标集 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 中挑选出最不重要的指标,记为 $x_{j_n}$ ,此时评价指标集被重新记为 $\{x_{j_1}, x_{j_2}, \dots, x_{j_n}\}$ ,然后将最不重要的指标 $x_{j_n}$ 作为唯一参照物,人为赋予其余指标 $x_{j_k}$  ( $k=1, 2, \dots, n-1$ ),相对于 $x_{j_n}$ 的重要程度比值,最后通过重要程度比值计算出各指标的权重<sup>[17]</sup>。具体步骤如下:令 $r_{kn} = \alpha_k$  ( $k=1, 2, \dots, n-1$ )为 $x_{j_k}$ 相对于 $x_{j_n}$ 的重要程度之比,为一具体数值,显然 $\alpha_k \geq 1$ ,取 $\alpha_n = 1$ 。此时,指标 $x_{j_k}$ 的权重为:

$$\omega_k = \alpha_k / \sum_{x=1}^n \alpha_x, \quad k=1, 2, \dots, n \quad (3)$$

表2 L, E, C取值范围表

Tab 2 Table of the range of values for L, E and C

L 值	事故发生可能性	E 值	事故发生频繁程度	C 值	事故可能造成后果
10	完全可以预料	10	连续暴露	100	大灾难,许多人死亡
6	相当可能	6	每天工作时间暴露	40	灾难,数人死亡
3	可能,但不经常	3	每周1次,或偶然暴露	15	非常严重,1人死亡
1	可能性小,完全意外	2	每月1次暴露	7	严重、重伤
0.5	很不可能,可以设想	1	每年1次暴露	3	重大、致残
0.2	极不可能	0.5	非常罕见的暴露	1	引人注目,需要救护
0.1	实际不可能				

对风险清单里的各项风险因素分别确定L、E、C值,经过计算可以得到各风险因素的风险数值D,可进一步判断各风险因素的危险等级。

### 2.3 基于熵值修正G2法的D值计算

为消除传统LEC的主观性,因此对D值进行修正。思想如下:首先,由于不同的风险所发生的可能性、频率和所产生的危害后果不尽相同,且不同专家具有工作环境、身份及考虑角度等主观因素的差异,因此针对不同风险因素专家的打分结果具有一定数据变异性,不同的专家打出的分数也具有一定的离散程度。基于现实情况,对风险集准确的评价分数应落入某一具体区间,因此专家对风险集打出的分数的离散程度一定程度上代表了专家对风险清

### 2.2 传统的LEC法

LEC法可以衡量人们在某种具有潜在危险的环境中作业的危险性及危害性,因为其简单易行的优点,被大量地应用在施工作业活动中的危险性评价<sup>[18]</sup>。作业条件的危险性大小取决于三个因素:事故发生的可能性(L)、人员暴露于危险环境的频繁程度(E)和一旦发生事故可能造成的后果(C),LEC法中的风险数值(D)的计算公式如下:

$$D = L \times E \times C \quad (4)$$

根据文献,L、E、C的取值见表2<sup>[19]</sup>。

单的认知程度,故而可通过计算熵值来判断专家对风险清单的认知情况。熵值越小,表明专家越具有可信度,对应的权重也就越高。再结合G2法,根据对专家从业经验、职务、职称等,在参与调查的专家中,依据专家评分表(见表3),选出最不重要的专家,作为唯一参照物。并根据熵值得到其余专家相对于最不重要的专家的重要程度比值,最后依据重要程度比值得到各专家的权重 $\omega_x$ ,基于此来消除不同专家评分差异所带来的影响。则修正后的D值为:

$$D = \sum_{x=1}^n \omega_x D_x \quad (5)$$

式中 $D_x$ 为第x个专家给出的分数。

表3 专家评分表

Tab 3 Expert scoring sheet

类别	一级	二级	三级	四级	五级
年龄/岁	18~30	31~40	41~50	51~	
从业时间/年	0~5	6~10	11~15	16~20	21~
职称	初级	中级	副高级	正高级	
职务	技术员	副总工、部门负责人	生产/项目经理、安全总监、 总工和讲师	教授、技术专家	
分值	1	2	3	4	5

将依据专家从业经验、职务、职称等确定出的最不重要专家  $x_{j_n}$  作为唯一参照物,通过熵值判断其余各专家  $x_{j_k} (k = 1, 2, \dots, n-1)$  与  $x_{j_n}$  的重要程度比值。

若  $e_{j_k} < e_{j_n}$ , 这说明专家  $x_{j_k}$  所给出的分数离散程度更高,  $x_{j_k}$  对评价结果起的作用也就越大。并且依据专家自身的从业经验、职务和职称来看,  $x_{j_k}$  的可信度也更高。综合以上主客观信息来看,将  $e_{j_n} / e_{j_k}$  作为专家间的重要程度比值,显然,此时比值大于 1。

若  $e_{j_k} \geq e_{j_n}$ , 这说明专家  $x_{j_k}$  的可信度不比  $x_{j_n}$  高,但结合专家自身情况来看,专家  $x_{j_k}$  的级别比  $x_{j_n}$  高,理应更具有可信度。但考虑到不同的专家所处环境不同,考虑的角度不同,以及新技术对主观经验的冲击等现实因素,为了平衡主观信息与客观数据的关系,认为两个专家具有相同的可信度,即重要程度比值为 1。

综上所述,令  $r_{kn} = \alpha_k (k = 1, 2, \dots, n-1)$  为  $x_{j_k}$  相对于  $x_{j_n}$  的重要程度之比,则:

$$r_{kn} = \alpha_k = \begin{cases} e_{j_n} / e_{j_k} & e_{j_k} < e_{j_n} \\ 1 & e_{j_k} \geq e_{j_n} \end{cases} \quad (6)$$

显然  $\alpha_k \geq 1$ , 取  $\alpha_n = 1$ 。

而专家权重的确定可由  $r_{kn}$  的定义得到。若  $\alpha_k$  越大,说明  $x_{j_k}$  的可信度越高,则相应的应赋予更大的权重。因此专家  $x_{j_k}$  的权重为:

$$\omega_k = \alpha_k / \sum_{x=1}^m \alpha_x, \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

不难发现,基于熵值修正 G2 法来计算  $D$  值,在衡量专家重要程度上具有巨大的优势,不仅考虑到专家的主观性与数据间所包含的信息,还可将重要程度比值数字化,使赋权方法简单化,从而增加了赋权的准确性。其次该方法结合了熵值法和 G2 法,巧妙地规避了熵值法过于在意数据变异性、对现实情况考虑欠佳的不足,也规避了 G2 法主观性过强的缺点,通过结合主、客观两方面因素来赋权,使评价结果更加科学。

### 3 案例分析

合肥新桥机场 S1 号线起于寿县蜀山产业园站,止于五里墩站,全线长 47.5 km,车站 14 座,其中地下线主要穿越地层为杂填土、第四系粉质黏土、下第三系始新统砂砾岩、细砂岩、粉砂质泥岩、白垩系上统泥岩、泥质砂岩和白垩系下统砂岩。沿线穿越机场、住宅、商业区、医院、高铁站,施工区域周边环境复杂。

为了评价结果的准确性,根据风险清单编制问卷,得到来自于施工单位、高校的 15 份问卷,参与问卷的专家信息见图 4。具体的问卷信息展示在后续计算中。

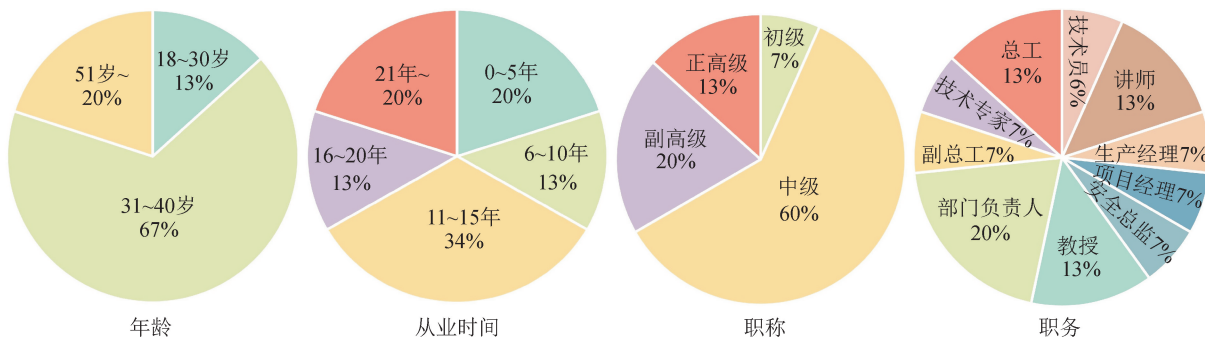


图 4 专家信息

Fig. 4 Information on experts

#### 3.1 专家权重计算

对收集到的问卷,按式(4)计算得出每位专家给出的  $D$  值。将不同专家对各个风险因素给出的  $D$  值列入表 4。由于篇幅有限,本文列出其中 6 位专家的打分情况。

首先,计算出各专家熵值。以 A 专家为例,将 A 专家对 40 项风险因素打出的  $D$  值代入式(1)中,得:

$$e_A = -\frac{1}{\ln 40} \left[ \frac{63}{63 + 42 + \dots + 10} \ln \frac{63}{63 + 42 + \dots + 10} + \dots + \frac{10}{63 + 42 + \dots + 10} \ln \frac{10}{63 + 42 + \dots + 10} \right] = 0.857 \quad (8)$$

列入表 5 中。同理,得到其余专家熵值,列入表 5。

表4 专家组对风险因素评价的D值(部分)  
Tab.4 D-values for risk factor evaluations by expert groups (partial)

风险	专家编号							风险	专家编号						
	A	B	C	...	M	N	O		A	B	C	...	M	N	O
A <sub>1</sub>	63	84	1 440	...	63	18	540	C <sub>1</sub>	6	42	9	...	6	75	0.5
A <sub>2</sub>	42	42	1 440	...	27	42	54	C <sub>2</sub>	18	126	42	...	18	70	3
A <sub>3</sub>	30	42	900	...	9	3	9	C <sub>3</sub>	0.4	6	9	...	9	75	0.5
A <sub>4</sub>	9	42	1 440	...	252	12	180	C <sub>4</sub>	0.25	6	18	...	6	35	0.5
A <sub>5</sub>	3	14	80	...	42	120	20	D <sub>1</sub>	18	42	540	...	6	480	3
A <sub>6</sub>	1.5	14	4.2	...	6	150	80	D <sub>2</sub>	21	42	720	...	3	45	9
A <sub>7</sub>	27	14	90	...	42	200	126	D <sub>3</sub>	7	84	252	...	36	10	18
A <sub>8</sub>	21	14	24	...	3	200	0.25	D <sub>4</sub>	9	84	126	...	36	10	18
B <sub>1</sub>	2	6	18	...	2	12	0.5	D <sub>5</sub>	9	42	540	...	1.5	500	15
B <sub>2</sub>	54	63	90	...	27	6	21	D <sub>6</sub>	3	42	36	...	9	5	15
B <sub>3</sub>	3	6	6	...	2	12	0.5	E <sub>1</sub>	0.5	18	3	...	9	5	0.5
B <sub>4</sub>	9	18	54	...	9	6	3	E <sub>2</sub>	6	18	10	...	6	5	6
B <sub>5</sub>	1	14	1 440	...	3	3	3	E <sub>3</sub>	9	6	21	...	18	5	6
B <sub>6</sub>	1	3	36	...	0.5	10	1.5	E <sub>4</sub>	18	6	90	...	2	5	42
B <sub>7</sub>	9	27	54	...	2	12	42	E <sub>5</sub>	1.5	18	9	...	6	21	0.5
B <sub>8</sub>	2	6	18	...	2	75	6	E <sub>6</sub>	3	18	54	...	9	9	6
B <sub>9</sub>	18	27	27	...	2	12	3.5	E <sub>7</sub>	18	54	180	...	42	21	0.5
B <sub>10</sub>	1.5	3	45	...	1	3	0.5	E <sub>8</sub>	9	6	270	...	42	45	0.5
B <sub>11</sub>	4.5	126	3 600	...	84	6	270	E <sub>9</sub>	18	6	12	...	6	10	6
B <sub>12</sub>	42	126	720	...	42	21	270	E <sub>10</sub>	10	18	14	...	18	3	9

表5 权重计算表  
Tab.5 Weight calculation table

指标	专家编号														
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
$e_k$	0.857 0	0.883 4	0.696 0	0.778 8	0.665 6	0.716 2	0.833 5	0.761 2	0.762 4	0.775 3	0.726 8	0.690 9	0.768 4	0.724 9	0.625 1
$\alpha_k$	1.030 8	1	1.269 4	1.134 4	1.327 3	1.235 5	1.059 9	1.160 5	1.158 7	1.139 4	1.215 5	1.278 7	1.149 7	1.218 8	1.413 3
$w_k$	0.057 9	0.056 2	0.071 4	0.063 8	0.074 6	0.069 3	0.059 6	0.065 2	0.065 1	0.064 0	0.068 3	0.071 9	0.064 6	0.068 5	0.079 4

其次,定量刻画专家组专家重要程度。本次参与调查的专家来自于工程建设从业人员和高校科研人员,涵盖面广,其中4位具有博士学位。在众专家中,B专家年龄最小,从业时间最短,职称最低,在专家评分中得分最低为4分,因此被选为最不重要专家。

接着通过熵值判断其余专家与B专家的重要程度比值。通过熵值计算结果可以看出,B专家的熵值为0.8834,是所有专家中最高的,这也从侧面验证了熵值修正G2法计算专家权重的科学性。通过式(6)进行重要程度比值的计算。以A专家为例,由于 $e_A = 0.857 < e_B = 0.8834$ ,因此A、B专家

的重要程度比值为 $\alpha_A = 0.8834/0.857 = 1.0308$ 。同理,得到其余专家的重要程度比值列入表5。

最后根据式(7)计算出各位专家的权重,以A专家为例, $w_A = 1.0308/(1.0308+1+\dots+1.4133) = 0.0579$ 。同理可得其余专家权重,列入表5。

### 3.2 修正的D值计算

计算得到各位专家的权重之后,通过式(5)可得出修正后的D值。以盾构机推进系统故障风险为例,其风险数值 $D = 3 \times 0.0579 + 6 \times 0.0562 + \dots + 0.5 \times 0.0794 = 19.2594$ ,通过表6对比可知,风险等级为V。

表 6 风险等级及评价结果

Tab. 6 Risk rating and evaluation results

D	危险程度	危险等级	风险因素
$D > 320$	极其危险,不能继续作业	I	$A_1, A_4, B_{11}, B_{12}, D_1$
$160 \sim 320$	高度危险,要立即整改	II	$A_2, A_5, A_6, A_7, D_3, D_4, D_5, D_6$
$70 \sim 160$	显著危险,需要整改	III	$A_3, A_8, B_2, B_5, D_2, E_4, E_7, E_8, E_{10}$
$20 \sim 70$	一般危险,需要注意	IV	$B_4, B_7, B_8, B_9, B_{10}, C_1, C_2, E_2, E_3, E_6, E_9$
$D < 20$	稍有危险,可以接受	V	$B_1, B_3, B_6, C_3, C_4, E_1, E_5$

同理,对其余风险因素进行计算,可得到整个风险清单的风险等级,经过整理,列入表 6。将风险按

不同来源角度对评价结果进行归纳,得到风险分类评价结果图,见图 5。

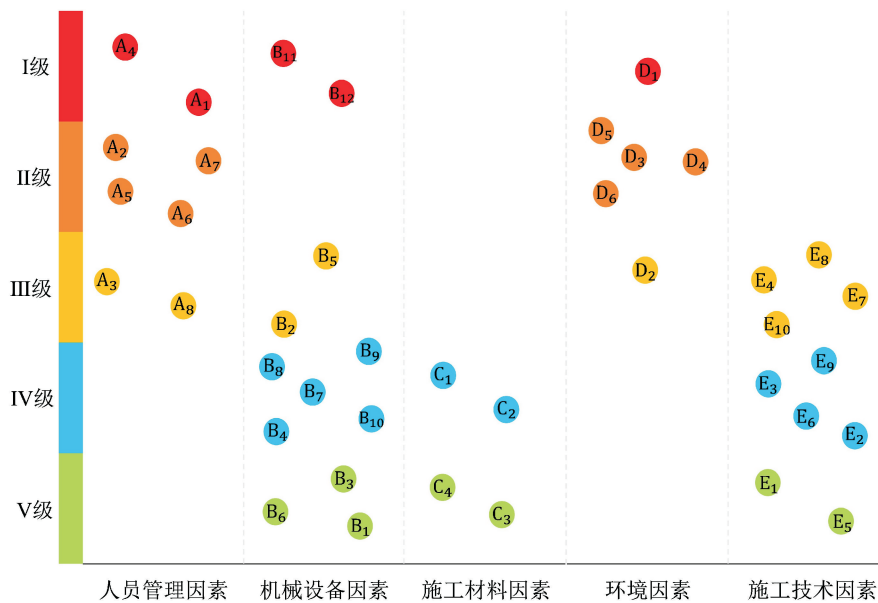


图 5 风险分类评价结果

Fig. 5 Risk classification evaluation results

### 3.3 结果分析

通过表 6 可知,经过专家组评估和对专家评价结果进行修正后,Ⅰ级风险共有 5 项,分别是工人对安全隐患警惕性低、工人在有潜在危险的环境施工、盾构机刀具更换作业风险、管片运输车脱轨及碰撞、盾构区间出现地下空洞或回填不密实的地质钻孔,这 5 项风险因素对应的施工活动需高度注意,停止施工并进行排查。Ⅱ级风险共有 8 项,分别是工人规范施工落实度低、紧急逃生系统与安全防护装置故障、实时动态监测不准确、施工安全隐患未按要求整改、盾构在软弱和复合地层中掘进、对盾构区间邻近建筑物和地下管线保护不当,这 8 项风险因素对应的作业活动需要立即进行整改。Ⅲ级风险共有 9 项,表明其对应的作业活动需要整改。Ⅳ级风险共有 11 项,表明这些风险因素值得引起注意。Ⅴ级风险共 7 项,表明这些风险因素可以接受。

本文提出的熵值-G2 法改进 LEC 法,具有评价

结果更加准确的优点。例如若仅采用熵值法结合 LEC 法进行评价,则对于危险源  $B_5$ 、 $D_2$ , 评价结果变为Ⅱ级高度危险,需要立即进行整改,会大大增加工作量,影响工程进度。而本文采用的 LEC 法在结合熵的概念的同时引入了 G2 法的思想,通过评价数据变异性的角度消除了专家个体打分时的主观随意性,也考虑了主观现实情况的影响,得到了更加真实的评价结果,反映出风险因素真实的危险程度。

通过风险来源角度来分析,源自人员管理和环境因素的风险的危险程度更加显著,相比之下其他角度的风险具有更低水平的危险程度。这表明在地铁盾构施工中,施工的装备、材料以及技术相对完备,相关工艺、技术发展成熟。而人员管理和复杂多变的环境因素成为安全施工的较大隐患,因此需要加强人员安全管理,提高安全规范施工意识,健全施工安全管理制度。此外,在施工全周期对周围环境进行实时监测,提前勘察,以确保施工安全。



根据不同风险因素的风险等级,制定不同的管控措施。对于危险性较高的风险因素,应建立分级安全管理体系,编制应急预案,对相关从业人员定期进行安全培训,自上而下提升安全意识。

#### 4 结 论

1) 地铁建设是复杂的工程项目,众多的参与人员带来了管理上的困难,周围环境的复杂性也带来了许多未知风险。4M1E中“人”和“环”具有更高的风险,因此需要加强人员管理和对地质环境、邻近建筑物等的监测。

2) 传统LEC法能简易准确地对风险因素进行评估,适用于复杂的评价项目。而熵值修正G2法的主客观赋权法规避了单一赋权法的片面性,巧妙地解决了组合赋权中组合系数难以科学分配的问题。本文将熵值修正G2法的思想引入到LEC法中,能有效地消除专家打分的主观随意性,使评价结果更准确。

3) 准确的评价结果对工程建设有重要意义,而影响评价结果的因素主要是问卷和评价方法。对于问卷,合理的设计和有价值的发放值得后续研究;对于方法,从原理的改进和结合程序计算是准确高效的基石,是本研究后续的重点。

#### 参考文献:

- [1] 屈军平,肖薄. 地铁施工安全管控双重预防信息化应用研究与实践[J]. 现代隧道技术,2022,59(增刊2):31-37.
- QU Junping, XIAO Bo. Research and application of the informationized dual prevention system for subway construction safety control [J]. Modern Tunnelling Technology, 2022,59(S2):31-37.
- [2] 陈辉华,李瑚均,户晓栋. 地铁盾构掘进安全影响因素及事故致因模型[J]. 铁道工程学报,2020,37(5):87-92.
- CHEN Huihua, LI Hujun, HU Xiaodong. Safety influential factors and accident causation model of subway shield construction[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2020,37(5):87-92.
- [3] 于文龙,张向阳. 基于博弈论-可拓理论的地铁施工安全评价[J]. 现代隧道技术,2021,58(增刊2):30-37.
- YU Wenlong, ZHANG Xiangyang. Subway construction safety evaluation based on game theory-extenics theory[J]. Modern Tunnelling Technology, 2021,58(S2):30-37.
- [4] 闫文周,门雪,杨翻艳. 基于相互作用矩阵的地铁施工风险评价[J]. 武汉大学学报(工学版),2019,52(9):796-801.
- YAN Wenzhou, MEN Xue, YANG Fanyan. Risk assessment of metro construction based on interaction matrix[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2019,52(9):796-801.
- [5] LI Meng, YU Hongliang, JIN Hongyu, et al. Methodologies of safety risk control for China's metro construction based on BIM[J]. Safety Science, 2018, 110 (Part A): 418-426.
- [6] LIU Ping, WANG Yu, HAN Tongze, et al. Safety evaluation of subway tunnel construction under extreme rainfall weather conditions based on combination weighting-set pair analysis model[J]. Sustainability, 2022, 14(16):9886.
- [7] WANG Z Z, CHEN C. Fuzzy comprehensive Bayesian network-based safety risk assessment for metro construction projects [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 70: 330-342.
- [8] HOU Wenhui, WANG Xiaokang, ZHANG Hongyu, et al. Safety risk assessment of metro construction under epistemic uncertainty: an integrated framework using credal networks and the EDAS method[J]. Applied Soft Computing, 2021, 108: 107436.
- [9] 刘择师,甘淑清,石渊博,等. 易损环境饱水淤泥地层基坑施工风险辨识[J]. 现代隧道技术,2022,59(增刊1):1079-1086.
- LIU Zeshuai, GAN Shuqing, SHI Yuanbo, et al. Risk identification of foundation pit construction in saturated silt stratum under fragile environment[J]. Modern Tunnelling Technology, 2022,59(S1):1079-1086.
- [10] SIAMI-IRDEMOOSA E, DINDARLOO S R, SHARIFZADEH M. Work breakdown structure (WBS) development for underground construction[J]. Automation in Construction, 2015, 58: 85-94.
- [11] YAN Hongyan, GAO Ce, ELZARKA H, et al. Risk assessment for construction of urban rail transit projects[J]. Safety Science, 2019, 118: 583-594.
- [12] 李宗坤,王特,葛巍,等. 基于WBS-RBS和AHP的港珠澳大桥人工岛建设风险分析[J]. 郑州大学学报(工学版),2020,41(3):62-66.
- LI Zongkun, WANG Te, GE Wei, et al. Risk analysis of artificial island construction of Hong Kong-Zhuhai-Macao bridge based on WBS-RBS and AHP methods[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2020,41(3):62-66.
- [13] 郭隆彪. 基于模糊综合评价的地铁盾构施工安全风险评价研究[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2019.
- GUO Longbiao. Safety risk assessment study of subway shield construction based on fuzzy comprehensive

- evaluation[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2019.
- [14] 刘文,赵挺生,张亚静,等. 地铁盾构施工安全风险规律分析与对策[J]. 中国安全科学学报,2017,27(10):130-136.
- LIU Wen, ZHAO Tingsheng, ZHANG Yajing, et al. Analysis of risk factors and countermeasures for metro shield construction[J]. China Safety Science Journal, 2017, 27(10): 130-136.
- [15] 匡轮,陈丽,郭倩倩. LEC 危险性评价法及其应用的再探讨 [J]. 安全与环境学报, 2018, 18(5): 1902-1905.
- KUANG Lun, CHEN Li, GUO Qianqian. Further discussion on the LEC evaluation method and its applications in the quantitative analysis of the risks[J]. Journal of Safety and Environment, 2018, 18(5): 1902-1905.
- [16] 张爱琳,张秀英,许有俊,等. 基于改进 AHP-熵值法的城市综合管廊施工进度风险模糊综合评价研究 [J]. 建筑技术,2017,48(9):922-926.
- ZHANG Ailin, ZHANG Xiuying, XU Youjun, et al. Study on modified AHP-ENTROPY method-based fuzzy comprehensive evaluation of urban utility tunnel construction schedule risk[J]. Architecture Technology, 2017, 48(9): 922-926.
- [17] 刘瑞,鲍学英. 基于熵值修正的 G2 法的绿色施工节水措施效益综合评价[J]. 水资源与水工程学报, 2020,31(3):169-174,179.
- LIU Rui, BAO Xueying. Comprehensive evaluation of green construction water saving measures based on entropy corrected G2 method[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2020, 31(3): 169-174, 179.
- [18] 孙林辉,尚康,袁晓芳. 基于 LEC 法的煤矿掘进作业岗位安全风险评价研究[J]. 煤矿安全,2019,50(12):248-252.
- SUN Linhui, SHANG Kang, YUAN Xiaofang. Research on safety risk assessment of coal mine excavating operation based on LEC method[J]. Safety in Coal Mines, 2019, 50(12): 248-252.
- [19] 许兴武,吴浩,刘永强,等. 基于改进 LEC 法的堤防施工危险源辨识及评价[J]. 水电能源科学,2022,40(5):131-134.
- XU Xingwu, WU Hao, LIU Yongqiang, et al. Identification and evaluation of dangerous sources in embankment construction based on improved LEC method[J]. Water Resources and Power, 2022, 40(5): 131-134.

(责任编辑 王绪迪)