

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2022.01.015

# 基于模糊综合评判法的地铁工程 总体风险等级评定方法

张 浩

(北京安捷工程咨询有限公司, 北京 100050)

**摘 要:** 结合目前国内多数城市轨道交通工程建设的安全风险管理模式, 依据施工图设计阶段的安全风险评估, 对工点自身风险和环境风险的安全风险等级进行评定。在施工图设计阶段安全风险评估的基础上, 利用模糊综合评判法, 提出一种将自身风险和环境风险结合起来综合判定工点总体风险等级的方法, 为后续城市轨道交通工程建设的安全风险评估和管理提出一种新思路。

**关键词:** 轨道交通; 风险评估; 自身风险; 环境风险; 模糊综合评定法; 风险等级

中图分类号: U231 文献标志码: A 文章编号: 1672-6073(2022)01-0096-05

## Evaluation Method of Overall Risk Grade of Metro Engineering Based on Fuzzy Comprehensive Evaluation Method

ZHANG Hao

(AGILETECH Engineering Consultants Co., Ltd., Beijing 100050)

**Abstract:** In this study, the safety risk level of the site and the environmental risks are evaluated based on the safety risk assessment in the design stage of construction drawings according to the current safety risk management mode of urban rail transit project construction in China. The fuzzy comprehensive evaluation method, a method of comprehensively judging the overall risk level of a work site that combines its own risks and environmental risks, is proposed based on the safety risk assessment in the construction drawing design stage. A new proposal is offered for safety risk assessment and management of follow up of urban rail transit project construction.

**Keywords:** rail transit; risk assessment; self-risk; environmental risk; fuzzy comprehensive evaluation method; risk level

### 1 研究背景

随着我国经济的持续、快速发展, 城市化进程不断加快, 为缓解城市交通拥挤状况, 国内各大城市相继开展了城市轨道交通建设。2000年以后, 城市轨道交通建设不断提速, 使我国成为世界上城市轨道交通建设里程最长、建设城市最多、建设速度最快的国家。近年来, 城市轨道交通行业广泛开展工程建设全过程安全风险管理, 注重从源头上和过程中把控风险, 形

成了比较成熟的风险管控方法。

目前, 国内多数城市轨道交通工程在安全风险管理工作中, 将风险划分为工程自身风险和环境风险两大类。金准等<sup>[1]</sup>根据现行的标准规范和政府文件, 系统研究地下工程安全风险评估的内容、程序、方法及相关管理要求, 提出风险等级标准、分级原则和不同施工方法的工程自身风险及环境影响风险评估的要点; 吴锋金等<sup>[2]</sup>对轨道交通工程的风险等级标准划分

收稿日期: 2021-04-19 修回日期: 2021-05-19

作者简介: 张浩, 男, 硕士, 工程师, 主要从事轨道交通安全风险咨询工作, 772903421@qq.com

引用格式: 张浩. 基于模糊综合评判法的地铁工程总体风险等级评定方法[J]. 都市轨道交通, 2022, 35(1): 96-100.

ZHANG Hao. Evaluation method of overall risk grade of metro engineering based on fuzzy comprehensive evaluation method[J]. Urban rapid rail transit, 2022, 35(1): 96-100.

进行了研究,提出根据城市轨道交通工程建设阶段的不同,选择适宜的标准进行风险等级划分;骆建军等<sup>[3]</sup>针对地铁施工对邻近建筑物的安全影响,提出了安全管理的程序、方法和内容以及建筑物的一般保护措施;吴贤国等<sup>[4]</sup>分析了地铁隧道施工邻近建筑物的安全风险,提出了安全风险等级的划分方法和标准;王焯晟等<sup>[5]</sup>提出了利用模糊层次分析法,对地铁工程周边建筑物安全风险等级进行半定量分析;张晓斌等<sup>[6]</sup>基于信息熵权理论,提出利用风险评价矩阵法确定风险等级。然而,目前对工点总体风险等级评定的相关讨论和研究较少。笔者在静态风险评估(即城市轨道交通工程施工图设计阶段的安全风险评估)的基础上,利用模糊综合评定法,提出一种将工点自身风险和環境风险相结合、综合判定工点总体风险等级的方法。该方法能较为客观地评定工点总体风险的大小,能更有效地对风险进行预控,为工程的实际风险管控工作提供参考。

## 2 施工图设计阶段安全风险评估

### 2.1 评估目的

施工图设计阶段安全风险评估,是在初步设计阶段安全风险评估成果的基础上,结合施工组织设计和施工方案等资料,有针对性地开展安全风险辨识、分析,进行风险源分类与风险分级,提出针对性的工程风险管控措施和建议,为施工阶段科学化、系统化和规范化地动态管控风险提供依据和参考。

### 2.2 评估内容

以《太原市轨道交通2号线一期工程施工图设计阶段风险评估报告》为例,通过对工点风险源的辨识,将工点风险类型分为自身风险和環境风险两类,依据《城市轨道交通地下工程建设风险管理规范》<sup>[7]</sup>,将工点自身风险和環境风险等级划分为I、II、III、IV共4级,I级风险等级最高,IV级风险等级最低。

地下工程自身风险是由于地下工程自身建设要求或施工活动所导致的风险,如深大基坑工程风险和大断面隧道施工风险等。自身风险等级主要考虑地质条件、工程结构埋深、结构特性(地下结构层数、跨度、断面形式、覆土厚度、开挖方式)等风险因素<sup>[7]</sup>。

地下工程環境风险是在建设活动中导致周边区域的构筑物受到影响或被破坏,其等级根据城市轨道交通地下结构与工程影响区范围内环境设施的重要性、位置关系、地下结构类型与施工方法等因素划分<sup>[7]</sup>。

## 3 工点总体风险等级评定模型

### 3.1 影响因素

#### 3.1.1 工点自身风险因素

根据现有城市轨道交通工程风险评估和管控经验,可对不同施工方法的工程自身风险进行分解。例如,可将明挖工程工点的自身风险分解为止水帷幕施工风险、围护桩施工风险、地连墙施工风险、地下水控制施工风险、深基坑开挖施工风险、异形基坑施工风险、铺盖法施工风险、倒撑施工风险等。通过施工图设计阶段的安全风险评估,对上述风险进行风险等级评定,并汇总出工点自身风险清单。将各等级自身风险数量作为工点总体风险等级评定的影响因素,工点各等级自身风险数量统计如表1所示。

表1 工点自身风险统计例表

Table 1 Statistical example of risk sources of construction site

| 工点名称 | I级风险/个 | II级风险/个 | III级风险/个 | IV级风险/个 |
|------|--------|---------|----------|---------|
| 工点A  | 0      | 4       | 7        | 4       |
| 工点B  | 0      | 6       | 8        | 5       |
| ⋮    | ⋮      | ⋮       | ⋮        | ⋮       |

#### 3.1.2 工点環境风险因素

根据现有城市轨道交通工程风险评估和管控经验,環境风险类型主要有各类管线、管廊、建筑物和构筑物等。通过施工图设计阶段的风险评估,对上述风险进行风险等级评定,并汇总出工点環境风险清单。将各等级環境风险数量作为工点总体风险等级评定的影响因素,工点各等级環境风险统计如表2所示。

表2 工点環境风险统计例表

Table 2 Statistical examples of environmental risk sources in construction sites

| 工点名称 | I级风险/个 | II级风险/个 | III级风险/个 | IV级风险/个 |
|------|--------|---------|----------|---------|
| 工点A  | 0      | 3       | 10       | 3       |
| 工点B  | 0      | 5       | 9        | 6       |
| ⋮    | ⋮      | ⋮       | ⋮        | ⋮       |

### 3.2 评定模型

工点总体风险等级的评定涉及多个影响因素,本研究基于施工图设计阶段的风险评估成果,最终选取了8个主要影响因素,即I级自身风险、II级自身风险、III级自身风险、IV级自身风险、I级環境风险、II级環境风险、III级環境风险、IV级環境风险(见图1);

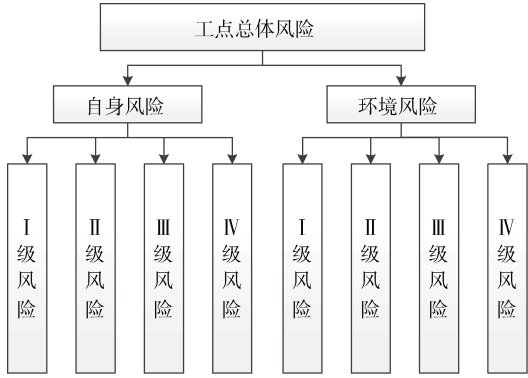


图 1 工点总体风险与影响因素关系  
Figure 1 Relationship between overall risk and influencing factors of construction site

表 3 影响因素及评判等级

Table 3 Influencing factors and evaluation grade

| 工点总体<br>风险等级 | 自身风险    |          |           |          | 环境风险    |          |           |          |
|--------------|---------|----------|-----------|----------|---------|----------|-----------|----------|
|              | I 级风险/个 | II 级风险/个 | III 级风险/个 | IV 级风险/个 | I 级风险/个 | II 级风险/个 | III 级风险/个 | IV 级风险/个 |
| I            | ≥1      | >2       | >8        | >15      | ≥1      | >4       | >14       | >20      |
| II           | 0       | 1~2      | 6~8       | 11~15    | 0       | 2~4      | 11~14     | 16~20    |
| III          | 0       | 0~1      | 2~6       | 8~11     | 0       | 0~2      | 8~11      | 12~16    |
| IV           | 0       | 0        | 0~2       | 0~8      | 0       | 0        | 0~8       | 0~12     |

3.2.2 隶属函数及权重确定

从表 3 可以看出，所选取的影响因素指标均为定量指标，参考目前国内对隶属函数的应用<sup>[3-5, 11-12]</sup>，选择基于二次抛物线型隶属函数来表述影响因素指标，即

$$A(x) = \begin{cases} 1 & (x \geq a_1) \\ 1 - \frac{1}{2} \left( \frac{x - a_2}{a_1 - a_2} \right)^2 & (a_2 \leq x < a_1) \\ 1 - \frac{1}{2} \left( \frac{x - a_3}{a_2 - a_3} \right)^2 & (a_3 \leq x < a_2) \\ 0 & (x \leq a_3) \end{cases} \quad (1)$$

以自身风险中的 III 级风险影响因素为例，其隶属函数为

$$A_I(x) = \begin{cases} 1 & (x \geq 8) \\ \frac{1}{2} \left( \frac{x - 6}{2} \right)^2 & (6 \leq x < 8) \\ 0 & (x < 6) \end{cases} \quad (2)$$

$$A_{II}(x) = \begin{cases} 0 & (x \geq 8) \\ 1 - \frac{1}{2} \left( \frac{x - 6}{2} \right)^2 & (6 \leq x < 8) \\ 1 - \frac{1}{2} \left( \frac{x - 4}{2} \right)^2 & (4 \leq x < 6) \\ 0 & (x < 4) \end{cases} \quad (3)$$

再利用模糊综合评定法，通过隶属度函数确定评判级别的隶属度，进而对工点总体风险等级进行综合判定。

3.2.1 风险分级和影响因素

影响因素的选取直接关系到评定模型的分析 and 计算。根据工点总体风险等级评定模型，选取了工点不同风险类型、不同风险等级数量作为影响因素。同时，根据国内多个城市的安全风险评估经验和风险事件案例<sup>[8-10]</sup>，统计分析了工点不同风险类型、不同风险等级数量对应的工点土建施工阶段的整体风险状况，最终选取以风险数量作为单一影响因素来判定工点总体风险等级的依据，综合汇总编制了工点总体风险等级的评判标准，如表 3 所示。

$$A_{III}(x) = \begin{cases} 0 & (x \geq 6) \\ 1 - \frac{1}{2} \left( \frac{x - 4}{2} \right)^2 & (4 \leq x < 6) \\ 1 - \frac{1}{2} \left( \frac{x - 2}{2} \right)^2 & (2 \leq x < 4) \\ 0 & (x < 2) \end{cases} \quad (4)$$

$$A_{IV}(x) = \begin{cases} 0 & (x \geq 4) \\ \frac{1}{2} \left( \frac{x - 2}{2} \right)^2 & (2 \leq x < 4) \\ 1 & (x < 2) \end{cases} \quad (5)$$

由于不同的影响因素对工点总体风险等级的影响程度不同，根据工程实践经验和各类风险事件案例<sup>[8-10]</sup>，分别对影响因素赋予不同的权重，即  $B = \{\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4, \gamma_5, \gamma_6, \gamma_7, \gamma_8\}$ ，其中  $\gamma_1 \sim \gamma_8$  分别对应自身风险和 环境风险的 I ~ IV 级风险影响因素的权值，如表 4 所示。

3.2.3 总体风险等级的确定

依据表 3 所示的 8 个影响因素和 4 类风险等级，可得到评判集(即等级论域)，有

$$U = \{u_1, u_2, u_3, u_4\} = \{I, II, III, IV\} \quad (6)$$

通过隶属函数  $A(x)$ ，可计算出影响因素的模糊评判矩阵，即

表 4 各影响因素权值对应表

Table 4 Corresponding table of weight of each influencing factor

| 名称 | 自身风险  |        |         |        | 环境风险  |        |         |        |
|----|-------|--------|---------|--------|-------|--------|---------|--------|
|    | I 级风险 | II 级风险 | III 级风险 | IV 级风险 | I 级风险 | II 级风险 | III 级风险 | IV 级风险 |
| 权重 | 0.235 | 0.195  | 0.113   | 0.082  | 0.195 | 0.103  | 0.064   | 0.013  |

$$C = \begin{pmatrix} u_{11} & \cdots & u_{14} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{81} & \cdots & u_{84} \end{pmatrix} \quad (7)$$

式中,  $u_{ij}$  为第  $i$  项影响因素指标对第  $j$  等级(工点总体风险等级)的隶属度。

将权重向量与模糊评判矩阵相乘, 进而得出工点总体风险等级的模糊判断, 即  $A=BC$ , 计算出评判集  $U$  的模糊子集  $A=\{a_1, a_2, a_3, a_4\}$ , 再根据最大隶属度原则, 选取最大值对应  $A$  中的位置来作为工点的总

体风险等级。

#### 4 工点总体风险等级评定实例

以太原轨道交通 2 号线一期工程车站工点为例, 对车站工点的总体风险等级进行评定。先根据施工图设计阶段的安全风险评估, 统计出工点自身风险和环境的各等级风险数量; 再将统计结果代入评定模型, 计算出工点的综合风险等级。

以大南门站为例, 该车站的各类风险统计情况如表 5 所示。

表 5 大南门站风险情况统计

Table 5 Statistics on risk sources of Dananmen station

| 名称   | 自身风险    |          |           |          | 环境风险    |          |           |          |
|------|---------|----------|-----------|----------|---------|----------|-----------|----------|
|      | I 级风险/个 | II 级风险/个 | III 级风险/个 | IV 级风险/个 | I 级风险/个 | II 级风险/个 | III 级风险/个 | IV 级风险/个 |
| 大南门站 | 0       | 1        | 4         | 2        | 0       | 6        | 16        | 1        |

将表 5 数据代入表 3 和隶属函数  $A(x)$ , 得出评价因素的模糊评判矩阵, 即

$$C = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

将权重向量与模糊评判矩阵相乘, 即  $A=BC$ , 计算出评判集的模糊子集  $A=\{0.167, 0.195, 0.113,$

$0.095\}$ , 根据最大隶属度原则, 得出大南门站的工点总体风险等级为 II 级。

根据《太原市轨道交通 2 号线一期工程安全风险管理与监控实施项目总结报告》, 大南门站在土建施工阶段风险事件频发, 使工期延长, 同时给安全施工带来诸多不确定因素, 该站的主要风险事件如表 6 所示。

由大南门站在整个土建施工阶段发生的风险事件及周边环境变形情况(见图 2、3)可知, 该站的工点总体风险等级评定为 II 级是合理的。

因此, 对太原轨道交通 2 号线一期工程的其余 22 个车站进行工点的总体风险评定, 得出全线 23 个车站工点总体风险等级的分级情况, 如表 7 所示。

表 6 大南门站的主要风险事件统计

Table 6 Statistics on main risk events in Dananmen station

| 序号 | 事件类型     | 风险事件概述                                                                                                       | 备注                     |
|----|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| 1  | 地连墙接缝渗漏水 | 主体基坑南段开挖至第三道支撑下方时, 基坑南盾构井东侧大阳角位置地连墙接缝出现渗漏水现象, 并携泥带砂, 导致基坑与迎泽湖之间地面塌陷                                          | 在附属工程基坑开挖过程中, 该类风险多次发生 |
| 2  | 基底涌水涌砂   | 1 号线大南门站东基坑 29 轴位置, 土方开挖至第三道支撑下 3 m、临近基底位置时, 29 轴中部降水井处发生涌水涌砂事件                                              |                        |
| 3  | 周边环境变形   | 基坑北端头土方开挖至第 4 道支撑下 1 m 时, 基坑北侧多条雨污水管、2 300 mm×1 800 mm 雨水方涵渗漏, 导致明水灌入基坑, 围挡外侧迎泽大街道路靠近基坑一侧路面塌陷, 并造成大南门站北侧围挡坍塌 |                        |
| 4  | 周边环境变形   | 中财大酒店地下室裂缝、渗漏水, 最大变形值为-68 mm(JGC5-3)                                                                         |                        |
| 5  | 周边环境变形   | 市总工会科技楼(III)墙体、底板等结构部位开裂, 最大变形值为-61.7 mm(JGC8-8)                                                             |                        |



图 2 地连墙接缝渗水并携泥带砂

Figure 2 Ground wall joints see water and carry mud and sand



图 3 基坑周边地表塌陷

Figure 3 Surface collapse around foundation pit

表 7 全线车站工点总体风险等级

Table 7 Comprehensive risk levels of station sites across the line

| 工点总体风险等级 | 风险简述     | 总数 |
|----------|----------|----|
| I        | 工点整体风险大  | 1  |
| II       | 工点整体风险较大 | 4  |
| III      | 工点整体风险一般 | 9  |
| IV       | 工点整体风险较小 | 9  |

## 5 结语

笔者对地铁工程总体风险等级的评定方法进行研究,在施工图设计阶段的安全风险评估基础上,充分考虑工点自身风险和环境影响对工点总体风险等级的影响,研究制定了相应的风险等级评判标准,建立了工点综合风险等级的模糊评判方法及流程,并通过实例进行了验证。该方法能够较为客观地确定工点总体风险的等级,便于对工点总体风险进行分级管控,同时为后续城市轨道交通工程安全风险评估提供重要参考。

### 参考文献

[1] 金准, 吕培印, 徐耀德. 地铁初步设计地下工程安全风险评估研究[J]. 都市轨道交通, 2012, 25(5): 42-47.  
JIN Huai, LYU Peiyin, XU Yaode. Research of risk assessment of underground works in preliminary design for subways[J]. Urban rapid rail transit, 2012, 25(5): 42-47.

[2] 吴锋金, 金准, 徐耀德, 等. 城市轨道交通地下工程风

险等级标准研究[J]. 施工技术, 2012, 41(363): 17-21.  
WU Fengjin, JIN Huai, XU Yaode, et al. Research on risk grade standards for underground engineering of urban rail transit[J]. Construction technology, 2012, 41(363): 17-21.

[3] 骆建军, 张顶立, 王梦恕, 等. 地铁施工对邻近建筑物安全风险等级评价[J]. 岩土力学, 2007, 28(7): 1478-1482.  
LUO Jianjun, ZHANG Dingli, WANG Mengshu, et al. Safety risk management of adjacent buildings in subway construction[J]. Rock and soil mechanics, 2007, 28(7): 1478-1482.

[4] 吴贤国, 陈晓阳, 丁烈云, 等. 地铁隧道施工邻近建筑物安全风险等级评价[J]. 施工技术, 2011, 40(7): 78-80.  
WU Xianguo, CHEN Xiaoyang, DING Lieyun, et al. Evaluation of the safety risk level of adjacent buildings in subway tunnel construction[J]. Construction technology, 2011, 40(7): 78-80.

[5] 王焯晟, 陈文华. 受地铁施工影响建筑物安全风险等级评定研究[J]. 路基工程, 2015(3): 42-46.  
WANG Yesheng, CHEN Wenhua. Research on the evaluation of safety risk level of buildings affected by metro construction[J]. Subgrade engineering, 2015(3): 42-46.

[6] 张晓斌, 李俊伟, 吕培印, 等. 区间熵理论在地铁工程定量风险评估中的应用[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(8): 35-39.  
ZHANG Xiaobin, LI Junwei, LYU Peiyin, et al. The application of zone entropy theory in quantitative risk assessment of subway engineering[J]. Urban mass transit, 2020, 23(8): 35-39.

[7] 城市轨道交通地下工程建设风险管理规范: GB50652—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.  
Code for risk management of underground engineering construction of urban rail transit: GB50652—2011[S]. Beijing: China Architecture & Building, 2011.

[8] 太原市轨道交通发展有限公司. 太原轨道交通2号线一期工程风险事件案例汇编[G]. 太原, 2021.

[9] 北京安捷工程咨询有限公司. 城市轨道交通土建工程建设安全风险评估与控制[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.

[10] 北京安捷工程咨询有限公司. 城市轨道交通土建附属工程安全管控案例分析[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.

[11] 李松槐, 袁有霞. 定量评价指标隶属度的确定[J]. 河南教育学院学报(自然学科版), 1999, 4(8): 6-8.

[12] 周红波, 倪志芳, 高文杰. 轨道交通建设安全风险评估与控制措施研究[J]. 地下空间与工程学报, 2008, 4(5): 985-990.  
ZHOU Hongbo, NI Zhifang, GAO Wenjie. Research on safety risk assessment and control measures of rail transit construction[J]. Chinese Journal of underground space and engineering, 2008, 4(5): 985-990.

(编辑: 郝京红)