

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2024.05.001

# 地铁盾构隧道管片安全状态评价

张勇, 付山贤

(西安建筑科技大学 管理学院, 西安 710054)

**摘要:** 为准确评价地铁盾构隧道管片安全性, 基于对地铁盾构隧道管片结构病害的形成机制分析, 从管片变形、渗漏水、裂缝、拱顶脱落、材料劣化5个方面建立评价指标体系, 划分管片结构安全状态评价等级, 构建未知测度函数, 通过基于熵值改进的G2法确定权重, 根据置信度识别准则判断风险等级, 并将模型应用于某地铁盾构隧道, 对其管片结构进行安全状态评价。研究表明: 采用未知测度理论能够准确评价隧道管片的安全等级, 结果准确, 实用性强。

**关键词:** 盾构隧道; 管片; G2法; 未知测度理论

**中图分类号:** U45

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9833(2024)05-0001-09

**引文格式:** 张勇, 付山贤. 地铁盾构隧道管片安全状态评价[J]. 湖南工业大学学报, 2024, 38(5): 1-9.

## Security Status Evaluation of Metro Shield Tunnel Segments

ZHANG Yong, FU Shanxian

(School of Management, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** In view of an accurate evaluation of the security status of metro shield tunnel segments, based on the analysis of the formation mechanism of structural defects in metro shield tunnel segments, an evaluation index system is established from five aspects: segment deformation, water leakage, cracks, arch detachment, and material degradation, followed by a division of the security status evaluation level of the segment structure, as well as a construction of an unknown measurement function, with the weight determined by the G2 method based on entropy improvement, and the risk level determined based on the confidence recognition criterion. The model is applied to a metro shield tunnel in Hangzhou to evaluate the security status of its segment structure. The research results indicate that the application of uncertainty measurement theory can accurately evaluate the security level of tunnel segments, with accurate results and strong practicality.

**Keywords:** shield tunnel; pipe segment; G2 method; uncertainty measurement theory

随着城市化进程的加快, 城镇人口与日俱增, 地面交通系统已经满足不了居民的日常出行需求, 为缓解地面交通压力, 轨道交通在交通建设中占据越来越重要的地位。《城市轨道交通年度统计分析报告》显示, 截至2022年底, 我国已经有55个城市开

通了轨道交通, 合计运营线路有308条, 总长度为10 287.45 km。其中, 地铁运营线路长度为8 008.17 km, 在轨道运营线路的占比77.84%, 是最主要的轨道交通制式。相比于传统的明挖法和盖挖法, 盾构法因其安全高效、绿色环保、地面交通影响小等优势,

收稿日期: 2023-10-15

作者简介: 张勇, 男, 西安建筑科技大学教授级高工, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向为土木工程建造与安全管理,  
E-mail: xadayong@126.com

成为大多数城市修建地铁的首选方法。

盾构地铁修建于复杂的地下环境中，因受到周围建筑环境、地下水位变化、温度变化以及地表车辆循环荷载等多种因素的影响，在其运营过程中不可避免地会出现多种病害<sup>[1-2]</sup>，如管片变形、管片裂缝、管片渗漏水、管片脱落、管片劣化等。管片承担着隧道在运营阶段的主要荷载，因此管片病害的出现势必对隧道结构的承载力、耐久性和稳定性造成破坏，影响隧道的安全运营。对于管片结构病害的出现和发展势必直接影响隧道结构的整体安全。

本文通过对地铁盾构隧道管片病害类型及成因进行分析，按照评价指标选取原则，确定影响运营期地铁盾构隧道管片结构安全的指标体系，构建指标等级判断标准，采用未确知测度理论构建地铁盾构隧道管片安全状态评价综合模型。最后，基于此方法对某地铁盾构隧道区间进行安全评价，以验证该评价模型的准确性。

### 1 盾构隧道管片病害及成因分析

管片病害分为5类：变形、渗漏水、裂缝、拱顶脱落、材料劣化。这些病害不是单一存在的，每种病害在出现后，会加剧其他病害的发展。

#### 1.1 管片变形分析

##### 1.1.1 分类

对于预制装配式管片衬砌结构，由于管片间使用螺栓连接，柔性大、抵抗变形能力较弱<sup>[3]</sup>，在建成投入运营承载后，会出现朝向隧道内部的收敛变形，包括横向变形和纵向变形。

1) 横向变形。在竖向荷载的作用下，隧道受力发生变化，当产生横向收敛变形时，其水平直径增大、竖向高差减小，横断面会呈现出“横鸭蛋”状。隧道横向变形，会导致管环的封顶块与邻接块之间的接缝张开、侧向弹性密封垫失效、勾缝脱落、混凝土破碎掉块、钢筋锈蚀、接头螺栓受拉屈服，以及防水失效引起渗漏水等现象。隧道横向变形通常用水平变化描述。

2) 纵向变形。盾构隧道由预制管片拼接成环时，纵向刚度较小，抗变形能力较弱，在外部因素的作用下，结构在纵向上更容易产生变形。在多数情况下，纵向变形表现为管片环间接头张大和错台变形，两者分别反映了隧道纵向弯曲变形和剪切变形。环间接头张大大会导致管片接头螺栓受拉屈服及渗漏水等次生病害。错台会导致纵向连接螺栓趋向屈服、凹凸榫发生剪切破坏以及弹性橡胶止水垫变形，从而对隧道结构造成破坏，是隧道纵向变形的重要表现形式。

##### 1.1.2 形成原因

1) 振动荷载引起的隧道沉降变形。隧道在运营过程中，会受到列车长期往复循环的振动荷载，对处于饱和砂土层或饱和黏土层的盾构隧道来说，有发生液化或震陷的可能，对隧道的纵向变形产生影响。同时，部分处于地上交通相对繁忙的隧道区间，地面行车荷载和振动荷载也会加剧隧道的变形。

2) 隧道邻近建筑施工引起的沉降变形。地铁大多修建于城市中，隧道邻近范围内施工活动会破坏隧道周围土体的应力平衡，从而使土层产生沉降、隆起或侧向移动，进而导致隧道发生变形。

3) 隧道所处地层的水位变化。盾构隧道覆土厚度一般都大于7 m，对处于含水层和不透水层等复杂地层中的隧道而言，地下水位的变化会改变隧道结构的受力情况，从而引起隧道的沉降变形。

4) 其他。盾构隧道修建于地层之中，与周围土体关系密切，因此地震作用也是造成盾构隧道产生纵向变形的原因。

根据管片变形的致因分析制定管片变形故障树模型，如图1所示。

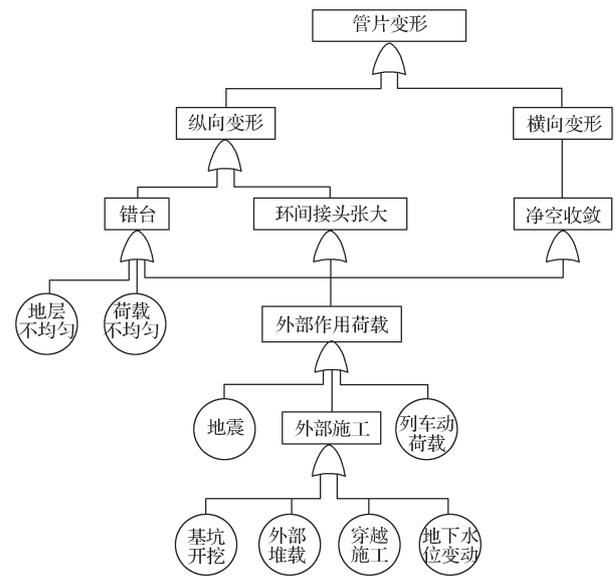


图1 管片变形故障树模型

Fig. 1 Segment deformation fault tree model

#### 1.2 管片渗漏水分析

##### 1.2.1 分类

渗漏水，主要是指地下水或者地表水在隧道运营过程中直接或间接地以渗、漏、涌等形式进入隧道内产生的危害<sup>[4]</sup>。根据盾构隧道中渗漏水渗流量的不同，一般将渗漏水分为湿迹、渗水、滴漏、漏泥砂4种类型。

##### 1.2.2 形成原因

1) 防水材料性能劣化。盾构隧道管片渗漏水多

发生在接缝处（环缝、纵缝、十字缝）和孔洞处（螺栓孔、注浆孔）。管片接缝处弹性密封垫与嵌缝防水材料在受到各种压力、温度变化以及有害物质侵蚀的作用下，容易出现蠕变、老化、破损及应力松弛等情况，致使接缝处密封垫与嵌缝材料防水性能大大减弱，导致渗漏水现象。

2) 隧道的不均匀沉降。城市地铁大部分都修建于地下水位以下的地层中，隧道结构在地铁运营循环荷载、外界荷载、软弱土层变形、砂性土层水土流失等因素的影响下，会出现不均匀的沉降，这会导致管片接缝处张开变形，而接缝张开变形会使弹性密封垫从压紧状态逐渐变松，从而使密封止水措施失效，发生渗漏水现象。

根据管片渗漏水的原因分析制定管片渗漏水故障树模型，如图2所示。

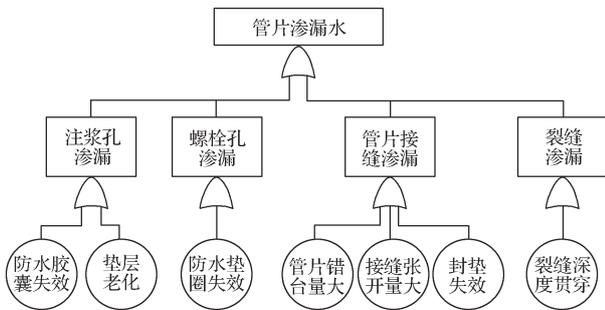


图2 管片渗漏水故障树模型

Fig. 2 Fault tree model for pipe segment water leakage

### 1.3 管片裂缝分析

#### 1.3.1 分类

按照裂缝的发展方向，可将管片裂缝分为环向裂缝和纵向裂缝；按照裂缝的形成原因，可将其分为变形裂缝和受力裂缝。此外，还包括管片角部轻微开裂。盾构隧道管片裂缝大多为邻接块及封顶块以管片的角部裂缝。

#### 1.3.2 形成原因

1) 各种动、静荷载。地铁在运营期间，列车的振动、地表荷载的变化以及周围土压力的变化等，都会导致混凝土管片产生裂缝。

2) 各种环境因素。包括温度变化（冰冻）、湿度变化、酸碱度变化等，都会使管片结构承受一定的应力而产生裂缝。

3) 其他因素。地下水位的变化、临近的基坑开挖，以及一些意外因素（如火灾）等，都有可能使管片产生裂缝。

根据管片裂缝的成因分析制定管片裂缝故障树模型，如图3所示。

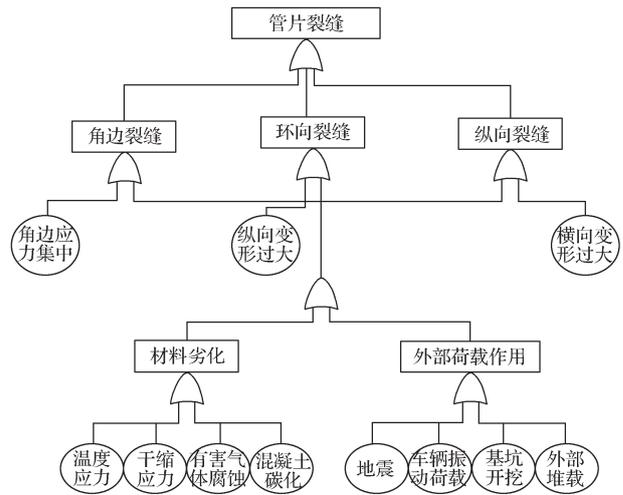


图3 管片裂缝故障树模型

Fig. 3 Fault tree model for segment cracks

### 1.4 管片拱顶脱落分析

#### 1.4.1 形成原因

拱顶脱落主要发生于盾构掘进方向管片后缘，并沿环向对称分布于拱顶，表现为较为严重的混凝土块状脱落。一般情况下，管片区域性脱落在盾构隧道中并不常见。环间错台是引起管片脱落的最直接因素，拱顶脱落通常出现在管片环间错台较大的位置。

#### 1.4.2 危害

拱顶脱落使管片纵向接头处的混凝土有效接触面积降低，环间混凝土接触面的摩擦力减小，从而减弱隧道纵向接头的抗剪切刚度。此外，混凝土有效截面降低会对管片环单元两侧混凝土的抗拉、抗压性能产生很大影响，从而大幅改变盾构隧道管片结构的纵向受力特性，甚至会引发纵向不均匀变形等次生病害。拱顶脱落会削弱隧道的整体防水性能，对结构的长期耐久性造成影响，甚至会危及结构的运行安全。

### 1.5 管片材料劣化分析

#### 1.5.1 分类

材料劣化的表现方式为混凝土碳化、钢筋锈蚀。混凝土碳化是水泥集料中的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  与空气中的  $\text{O}_2$  以及地下水（或列车尾气）中的  $\text{CO}_2$  发生水化反应，生成  $\text{CaCO}_3$  引起碳化作用。混凝土劣化后，侵入混凝土中的  $\text{O}_2$  和水与钢筋中  $\text{Fe}^{2+}$  发生锈蚀反应，产生  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  锈蚀物，引起钢筋锈蚀。

#### 1.5.2 形成原因

1) 环境作用。管片外侧直接与地层接触，会受土壤中  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  等有害介质的侵蚀，渗入混凝土保护层使混凝土产生溶解性腐蚀和膨胀性腐蚀，并扩散至钢筋表面击穿钝化膜与电解液水发生电化学反应，造成混凝土碳化和钢筋锈蚀。此外，由于地下隧道常较潮湿且通风不畅，因此  $\text{CO}_2$  浓度较高，

此高浓度酸性气体潮湿环境易使混凝土发生碳化。

2) 电流作用。对于地铁隧道，隧道内的杂散电流会与钢筋产生电腐蚀反应，从而导致钢筋锈蚀膨胀，也造成混凝土性能退化。

3) 酸雨作用。近年，多数地区的雨水中酸度加大、频率增大，酸雨使地下水水质受到污染，进而加速管片结构的劣化。

根据管片材料劣化的致因分析制定管片材料劣化故障树模型，如图4所示。

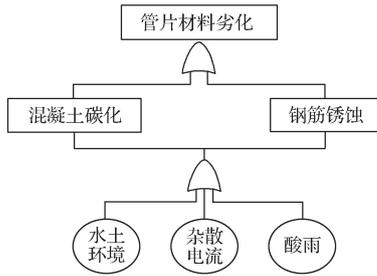


图4 管片材料劣化故障树模型

Fig. 4 Fault tree model for pipe segment material degradation

## 2 盾构隧道管片安全状态评价指标体系

### 2.1 评价指标体系的构建

盾构隧道管片结构安全状态评价涉及多方面的检测指标，合理构建评价指标体系对评价结果至关重要。本文利用AHP法简化指标体系，使影响盾构隧道管片病害的因素条理化、层次化。本文建立的层次性指标体系如图5所示。

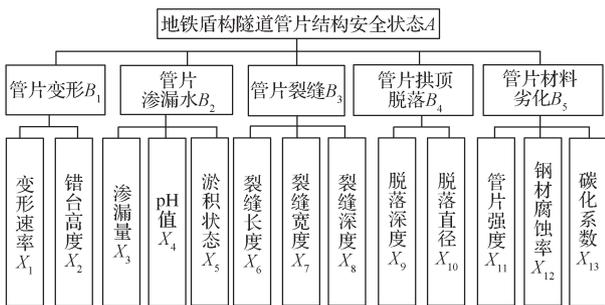


图5 评价指标体系

Fig. 5 Evaluation index system

### 2.2 安全状态等级的划分

根据现行规程及相关规范的规定<sup>[5-7]</sup>，参考相关文献<sup>[8-10]</sup>，本文选用四级划分法划分地铁盾构隧道管片结构安全状态等级，四级划分法划分的等级界限较明确、简单，且符合各级评价指标等级划分。

#### 2.2.1 管片结构安全状态等级划分

本文将地铁盾构隧道管片结构安全状态等级划分为四类：D类极不安全（管片严重破坏）、C类不

安全（管片较严重破坏）、B类基本安全（管片一般破坏）、A类安全（管片轻微破坏），具体判定标准如表1所示。

表1 地铁盾构隧道管片结构安全等级划分

Table 1 Structural security classification of metro shield tunnel segment structures

等级示意	病害状态	结构安全等级	表现状态
A	轻微破坏	安全	结构没有破坏或轻微破坏，对运营没有影响
B	一般破坏	基本安全	结构存在破坏，对运营有潜在影响，需要进行维修加固
C	较严重破坏	不安全	结构破坏较严重，影响运营安全，需要进行大修
D	严重破坏	极不安全	结构存在严重破坏，严重影响运营安全，需要立即进行除险加固

#### 2.2.2 管片变形判断标准

管片变形判定标准如表2所示。

表2 管片变形判断标准表

Table 2 Pipe sheet deformation judgment criteria table

准则层	指标层	A类病害	B类病害	C类病害	D类病害
管片变形	变形速率/(mm·a <sup>-1</sup> )	≤ 1	>1~3	>3~10	>10
	错台高度/mm	≤ 0.033	>0.033~4	>4~10	>10

#### 2.2.3 管片裂缝判断标准

管片裂缝判定标准如表3所示。

表3 管片裂缝判断标准表

Table 3 Criteria for judging pipe sheet cracks

准则层	指标层	A类病害	B类病害	C类病害	D类病害
管片裂缝	裂缝长度/m	≤ 1	>1~2.5	>2.5~5	>5
	裂缝宽度/mm	≤ 0.2	>0.2~0.3	>0.3~0.4	>0.4
	裂缝深度/结构厚度	≤ 1/4	>1/4~1/3	>1/3~1/2	>1/2

#### 2.2.4 管片渗漏水判断标准

管片渗漏水判定标准如表4所示。

表4 管片渗漏水判断标准表

Table 4 Judgement criteria for water leakage of pipe segments

准则层	指标层	A类病害	B类病害	C类病害	D类病害
管片渗漏水	渗漏量	轻微渗漏（湿润）	一般渗漏（滴漏）	较严重渗漏（涌流）	严重渗漏（射流）
	pH值	>6	>5~6	>4~5	≤ 4
	管片淤积	没有淤泥	轻微淤泥	底板大部分被淤积物覆盖	淤积严重，影响正常运营

#### 2.2.5 管片拱顶脱落判断标准

管片拱顶脱落判定标准如表5所示。

表 5 管片拱顶脱落判断标准表

Table 5 Judging criteria for pipe segment arch dislodgement

准则层	指标层	A 类 病害	B 类 病害	C 类 病害	D 类 病害
管片拱 顶脱落	脱落深度 /mm	≤ 6	>6~12	>12~25	>25
	脱落直径 /mm	≤ 50	>50~75	>75~150	>150

2.2.6 管片材料劣化判断标准

管片材料劣化判定标准如表 6 所示。

表 6 管片材料劣化判断标准表

Table 6 Judgment criteria for material degradation of pipe segments

准则层	指标层	A 类 病害	B 类 病害	C 类 病害	D 类 病害
管片	管片强度 $k_a$	>0.8	>0.5~0.8	>0.3~0.5	≤ 0.3
材料	钢材腐蚀率	≤ 3%	>3%~10%	>10%~25%	>25%
劣化	碳化系数 $k_c$	≤ 0.4	>0.4~0.7	>0.7~1	>1

注:  $k_a$  为实际强度 / 设计强度;  $k_c$  为碳化深度 / 保护层厚度。

3 盾构隧道管片安全状态评估

3.1 确定权重

本文采用基于熵值改进 G2 法<sup>[11]</sup> 确定指标权重, 步骤如下。

1) 指标标准化。

$$\text{负向指标: } X'_j = \frac{X_j(\max) - X_j}{X_j(\max) - X_j(\min)}; \quad (1)$$

$$\text{正向指标: } X'_j = \frac{X_j - X_j(\min)}{X_j(\max) - X_j(\min)}。 \quad (2)$$

2) 指标熵值  $e_j$ 。设最不重要指标为  $X_k$ , 通过指标熵值确定各指标与  $X_k$  的重要程度之比。

$$e_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n f_{ij} \ln(f_{ij}), \quad (3)$$

$$f_{ij} = -v_{ij} / \sum_{i=1}^n v_{ij}。 \quad (4)$$

式中,  $v_{ij} (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m)$  为指标值, 其中  $n$  为评价区段,  $m$  为指标数。

3) 根据熵值确定  $X_j$  与  $X_k$  的相对重要程度之比。将最不重要指标为  $X_k$  的信息熵为  $e_k$  作为唯一参照物, 计算其他指标的重要程度比值。

$$r_{jk} = a_j = \begin{cases} e_k / e_j, & e_j < e_k; \\ 1, & e_j \geq e_k。 \end{cases} \quad (5)$$

4) 各指标的权重。

$$w_j = a_j / \sum_{j=1}^m a_j, j=1, 2, \dots, m。 \quad (6)$$

3.2 基于未确知测度理论的安全评估

先前对盾构隧道结构安全性评估大多采用模糊综合评价法, 该方法用于地铁盾构隧道管片安全状态评价时, 评价值与评价因素间的隶属度函数不易确定, 且指标的重要度需要找多个专家依次评价再计算合理性, 实行性不强。本文采用的未确知测度理论更适合于对地铁隧道管片安全性进行评价。

3.2.1 单指标未确知测度

$u_{ijk} = u(X_{ij} \in C_t)$  为第  $i$  区段第  $j$  项指标测量值对第  $t$  个评价等级  $C_t$  的隶属程度, 且满足以下条件:

$$0 \leq u(X_{ij} \in C_t) \leq 1 (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots,$$

$$m; t=1, 2, \dots, q);$$

$$u(X_{ij} \in C) = 1 (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m);$$

$$u(X_{ij} \in \bigcup_{q=1}^t C_q) = \sum_{q=1}^t u(X_{ij} \in C_q) (t=1, 2, \dots, q)。$$

各指标对不同评价等级的隶属度可以形成单指标未确知测度评价矩阵:

$$(u_{ijk})_{m \times q} = \begin{pmatrix} u_{i11} & u_{i12} & \dots & u_{i1q} \\ u_{i21} & u_{i22} & \dots & u_{i2q} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{im1} & u_{im2} & \dots & u_{imq} \end{pmatrix}。 \quad (7)$$

3.2.2 多指标综合测度评价矩阵

各指标权重为  $w_j$ , 令  $u_{it} = u(R_i \in C_t)$  表示第  $i$  区段属于第  $t$  个评价等级  $C_t$  的程度。

$$u_{it} = \sum_{j=1}^m u_{ijt} w_j (i=1, 2, \dots, n; t=1, 2, \dots, q)。 \quad (8)$$

未确知测度  $u_{it}$  满足  $0 \leq u_{it} \leq 1, \sum_{i=1}^q u_{it} = 1$ 。

多指标综合测度评价矩阵为

$$(u_{it})_{n \times q} = \begin{pmatrix} u_{11} & u_{11} & \dots & u_{1q} \\ u_{21} & u_{21} & \dots & u_{2q} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{n1} & u_{n2} & \dots & u_{nq} \end{pmatrix}。 \quad (9)$$

3.2.3 置信度识别准则

置信度  $\lambda$  取值:  $0.5 \leq \lambda \leq 1$ ,

$$t_c = \min \left\{ t : \sum_{i=1}^t u_i \geq \lambda, t=1, 2, \dots, q \right\}。 \quad (10)$$

4 案例分析

选取某区间隧道工程进行案例分析, 该隧道管片外径为 6.2 m, 内径为 5.5 m, 厚 30 cm, 环宽 1.2 m, 采用 6 块混凝土管片错缝拼装而成, 标准块圆心

角为 72°，邻接块圆心角为 65°，封顶块圆心角为 15°。隧道上行线里程 K5+400~K6+100，长 700 m，

数据由现场检测得到。隧道现场监测与检测结果得到隧道某环的指标结果如表 7 所示。

表 7 病害数据检测统计表

Table 7 Disease data detection statistics table

准则层	指标层	单位	起止桩号			
			K5+486~K5+516	K5+520~K5+546	K5+550~K5+576	K5+580~K6+100
管片变形	变形速率	mm · a <sup>-1</sup>	4	1	2	2
	错台高度	mm	9	6	4.5	5
	渗漏量		轻微渗漏	轻微渗漏	一般渗漏	较严重渗漏
管片渗漏水	pH 值		6.5	4.5	5.5	5.5
	淤积状态		无	无	轻微	轻微
	裂缝长度	m	1.2	1.14	1.1	1.08
管片裂缝	裂缝宽度	mm	0.25	0.3	0.20	0.15
	裂缝深度 / 结构厚度		1/3	1/3	2/5	5/12
管片拱顶脱落	脱落深度	mm	6	12	10	14
	脱落直径	mm	50	65	70	90
	管片强度		0.7	0.9	0.5	0.8
管片材料劣化	钢材腐蚀率	%	20	19	16	18
	碳化系数		0.6	0.6	0.5	0.9

4.1 权重计算

1) 将各指标采用式 (1) (2) 进行无量纲化处理, 其中定性指标采用数字 1~4 表示严重程度递增。结果如表 8 所示。

表 8 指标数据标准化处理

Table 8 Standardization of indicator data

准则层	指标层	起止桩号			
		K5+486~K5+516	K5+520~K5+546	K5+550~K5+576	K5+580~K6+100
管片变形	变形速率 X <sub>1</sub>	0	1	0.67	0.67
	错台高度 X <sub>2</sub>	0	0.67	1	0.89
管片渗漏水	渗漏量 X <sub>3</sub>	1	1	0.5	0
	pH 值 X <sub>4</sub>	0	1	0.67	0.33
	淤积状态 X <sub>5</sub>	1	1	0	0
管片裂缝	裂缝长度 X <sub>6</sub>	0	0.5	0.83	1
	裂缝宽度 X <sub>7</sub>	0.33	0	0.67	1
管片拱顶脱落	裂缝深度 / 结构厚度 X <sub>8</sub>	1	1	0.2	0
	脱落深度 X <sub>9</sub>	1	0.25	0.5	0
管片材料劣化	脱落直径 X <sub>10</sub>	1	0.88	0.5	0
	管片强度 X <sub>11</sub>	0.5	1	0	0.75
	钢材腐蚀率 X <sub>12</sub>	0	0.25	1	0.5
	碳化系数 X <sub>13</sub>	0.75	0.75	1	0

2) 确定各指标熵值。按照式 (3) (4) 计算各指标熵值 e<sub>j</sub>, 结果如表 9 所示。

3) 根据图 5 管片病害评价指标体系, 设计调查问卷, 邀请相关轨道交通的 15 位专家在已确定的 13 项指标中挑选出来一个最不重要的指标, 通过归纳总结各位专家的意见, 决定以 pH 值即 X<sub>4</sub> 作为唯一参

照物指标。按照式 (5) 计算各指标与 X<sub>4</sub> 的重要程度之比, 结果如表 10 所示。

表 9 各指标熵值

Table 9 Entropy value of indicators

指标	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>
e <sub>j</sub>	0.78	0.78	0.76	0.78	0.50	0.77	0.73
指标	X <sub>8</sub>	X <sub>9</sub>	X <sub>10</sub>	X <sub>11</sub>	X <sub>12</sub>	X <sub>13</sub>	
e <sub>j</sub>	0.67	0.69	0.76	0.77	0.70	0.79	

表 10 各指标重要程度之比

Table 10 Comparison of ratio importance of indicators

指标	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>
α <sub>j</sub>	1.00	1.00	1.02	1.00	1.56	1.02	1.07
指标	X <sub>8</sub>	X <sub>9</sub>	X <sub>10</sub>	X <sub>11</sub>	X <sub>12</sub>	X <sub>13</sub>	
α <sub>j</sub>	1.16	1.13	1.02	1.02	1.11	1.00	

4) 确定各指标权重。按照式 (6) 计算各指标权重, 结果如表 11 所示。

表 11 各指标权重计算结果

Table 11 Indicator weights results

指标	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>
ω <sub>j</sub>	0.07	0.07	0.07	0.07	0.11	0.07	0.08
指标	X <sub>8</sub>	X <sub>9</sub>	X <sub>10</sub>	X <sub>11</sub>	X <sub>12</sub>	X <sub>13</sub>	
ω <sub>j</sub>	0.08	0.08	0.07	0.07	0.08	0.07	

4.2 基于未确知测度理论的安全评估

以 2.2 管片病害各指标划分为依据, 整理各指标等级划分标准, 其中定性指标采用数字 1~4 表示,

其病害严重程度逐渐加重,安全结构安全等级逐渐降低,具体如表12所示。

表12 管片安全状态评价指标判定标准

Table 12 Evaluation criteria for the security status of pipe segments

准则层	指标层	安全等级			
		A(C <sub>1</sub> )	B(C <sub>2</sub> )	C(C <sub>3</sub> )	D(C <sub>4</sub> )
管片变形	变形速率/(mm·a <sup>-1</sup> )	≤1	>1~3	>3~10	>10
管片渗漏	错台高度/mm	≤0.033	>0.033~4	>4~10	>10
	渗漏量	1	2	3	4
管片裂缝	pH值	>6	>5~6	>4~5	≤4
	管片淤积	1	2	3	4
管片拱顶脱落	裂缝长度/m	≤1	>1~2.5	>2.5~5	>5
	裂缝宽度/mm	≤0.2	>0.2~0.3	>0.3~0.4	>0.4
	裂缝深度/结构厚度	≤1/4	>1/4~1/3	>1/3~1/2	>1/2
管片材料劣化	脱落深度/mm	≤6	>6~12	>12~25	>25
	脱落直径/mm	≤50	>50~75	>75~150	>150
管片材料劣化	管片强度k <sub>a</sub>	>0.8	>0.5~0.8	>0.3~0.5	≤0.3
	钢材腐蚀率/%	≤3	>3~10	>10~25	>25
	碳化系数k <sub>c</sub>	≤0.4	>0.4~0.7	>0.7~1	>1

4.2.1 构建单指标未确知测度函数

分别将A级指标区间最大值、B、C级指标区间平均值、D级指标区间最小值为分级标准,建立每个指标的未确知测度函数,如图6所示。

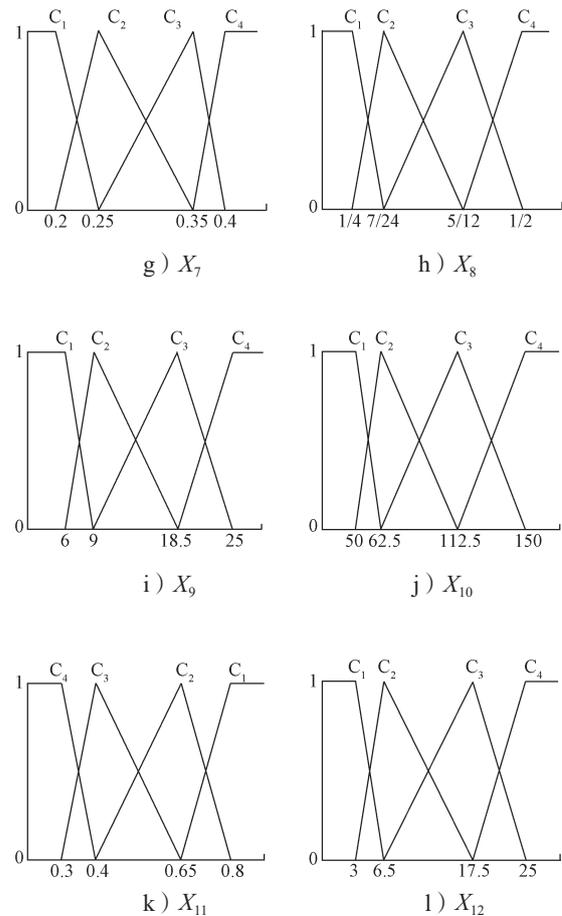
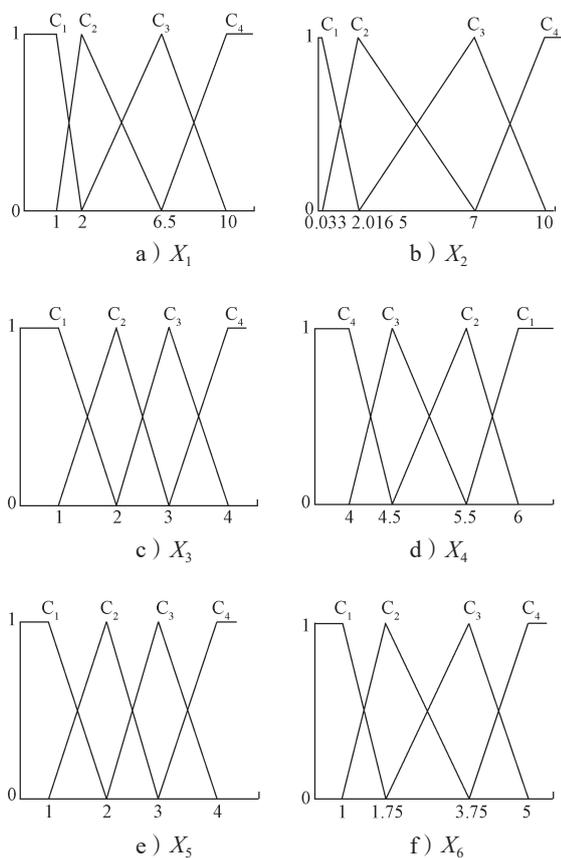


图6 各评价指标的单指标测度函数

Fig. 6 Single indicator measurement function for each evaluation indicator

4.2.2 建立单指标测度矩阵

将统计实测数据代入单指标测度函数,获得各区段的单指标测度矩阵如下:

$$(u_{1,jt})_{13 \times 4} = \begin{pmatrix} 0 & 0.56 & 0.44 & 0 \\ 0 & 0 & 0.33 & 0.67 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0.33 & 0.67 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.67 & 0.33 \\ 0 & 0.83 & 0.17 & 0 \end{pmatrix},$$

$$\begin{aligned}
 (\mathbf{u}_{2jt})_{13 \times 4} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0.8 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.8 & 0.2 \\ 0 & 0.83 & 0.17 & 0 \end{pmatrix}, \\
 (\mathbf{u}_{3jt})_{13 \times 4} &= \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0.5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0.4 & 0.6 & 0 \\ 0 & 0.14 & 0.86 & 0 \\ 0.33 & 0.67 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \\
 (\mathbf{u}_{4jt})_{13 \times 4} &= \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.4 & 0.6 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.93 & 0.07 \\ 0 & 0 & 0.67 & 0.33 \end{pmatrix}.
 \end{aligned}$$

#### 4.2.3 建立多指标综合测度评价向量

由表 11 得到 13 个指标的权重值为

$$\mathbf{w}_z = (0.07, 0.07, 0.07, 0.07, 0.11, 0.07, 0.08, 0.08, 0.08, 0.07, 0.07, 0.08, 0.07).$$

根据式 (8) 计算得到 4 个区段的多指标综合测度评价向量如下:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{u}_{1t} &= (0.48, 0.30, 0.15, 0.07), \\
 \mathbf{u}_{2t} &= (0.38, 0.37, 0.23, 0.02), \\
 \mathbf{u}_{3t} &= (0.16, 0.53, 0.31, 0), \\
 \mathbf{u}_{4t} &= (0.29, 0.25, 0.43, 0.03).
 \end{aligned}$$

#### 4.2.4 置信度识别

盾构隧道管片结构安全评价的评价等级空间  $\{C_1, C_2, C_3, C_4\}$  满足  $C_t > C_{t+1} (t=1, 2, 3)$ , 置信度  $\lambda$  取 0.6, 由式 (10) 计算得到:

1) K5+486~K5+516,

$$t_c = \min\{0.48 + 0.30 = 0.78 > 0.6\} = 2;$$

2) K5+520~K5+546,

$$t_c = \min\{0.38 + 0.37 = 0.75 > 0.6\} = 2;$$

3) K5+550~K5+576,

$$t_c = \min\{0.16 + 0.53 + 0.31 = 1 > 0.6\} = 3;$$

4) K5+580~K6+100,

$$t_c = \min\{0.29 + 0.25 + 0.43 = 0.97 > 0.6\} = 3.$$

#### 4.2.5 评价结果

地铁盾构隧道管片结构 4 个区段安全评价结果汇总, 如表 13 所示。

表 13 管片结构安全评价等级

Table 13 Pipe segment structure security evaluation ratings

区段	安全等级				本文评价	现场评价
	A(C <sub>1</sub> )	B(C <sub>2</sub> )	C(C <sub>3</sub> )	D(C <sub>4</sub> )		
K5+486~K5+516	0.48	0.30	0.15	0.07	B(C <sub>2</sub> )	基本安全
K5+520~K5+546	0.38	0.37	0.23	0.02	B(C <sub>2</sub> )	基本安全
K5+550~K5+576	0.16	0.53	0.31	0	C(C <sub>3</sub> )	不安全
K5+580~K6+100	0.29	0.25	0.43	0.03	C(C <sub>3</sub> )	不安全

由评价结果表中数据可知, 地铁盾构隧道管片结构区段 K5+486~K5+516 为一般破坏, 结构安全等级为基本安全; K5+520~K5+546 为一般破坏, 结构安全等级为基本安全; K5+550~K5+576 为较严重破坏, 结构安全等级为不安全; K5+580~K6+100 为较严重破坏, 结构安全等级为不安全。该评价结果与现场实际评价结果吻合, 说明基于熵值改进 G2 法与未确知测度理论在地铁盾构隧道管片结构安全评价方面具有一定的科学性和合理性。

## 5 结语

1) 本文考虑管片变形、管片渗漏水、管片裂缝、管片拱顶脱落及管片材料劣化 5 个方面, 详细划分变形速率、错台高度、渗漏量、pH 值、管片淤积状态、裂缝长度、裂缝宽度、裂缝深度、脱落深度、脱落直径、管片强度、钢材腐蚀率、碳化系数共 13 项评价指标, 全面反映了盾构隧道管片安全水平的综合状况。

2) 采用基于熵值改进的 G2 法计算各指标权重, 提高了指标权重的客观性; 采用未确知测度理论的置信度识别准则判定盾构隧道管片安全状态等级, 将影响地铁隧道管片安全性的因素中的定性评价指标通过测度函数转化为定量的数值, 在一定程度上降低了评价向量中极值对评价结果的影响, 在识别问题中使结果更加准确。

3) 通过对盾构隧道运营期管片病害发生机理进行分析, 选择未确知测度理论构建合理的评价模型评价隧道管片安全状态, 确定运营隧道管片结构安全等级, 可为地铁相关保护部门提供参考依据, 判断是否对隧道进行维修、加固, 消除安全隐患, 保障地铁交通安全长久运行。

## 参考文献:

- [1] 豆海涛, 吕延豪, 孙雪兵, 等. 多病害耦合作用下地铁盾构隧道单环管片健康度评价方法研究 [J/OL]. (2023-09-12). 铁道标准设计. <http://doi.org/10.13238/j.issn.1004-2954.202305140002>.  
DOU Haitao, LÜ Yanhao, SUN Xuebing, et al. Research on Health Evaluation Method of Single Ring Segment of Subway Shield Tunnel Under Multi-Disease Coupling[J/OL]. (2023-09-12). Railway Standard Design. <http://doi.org/10.13238/j.issn.1004-2954.202305140002>.
- [2] 林楠, 李攀, 谢雄耀. 盾构隧道结构病害及其机理研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(增刊2): 802-809.  
LIN Nan, LI Pan, XIE Xiongyao. Study on Structural Diseases and Mechanism of Shield Tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(S2): 802-809.
- [3] 陈春红, 周奇辉, 邢玉芳, 等. 软土地层地铁盾构隧道管片收敛变形整治方案 [J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(9): 185-190.  
CHEN Chunhong, ZHOU Qihui, XING Yufang, et al. Improvement Scheme for Metro Shield Tunnel Segment Convergence Deformation in Soft Soil Stratum[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(9): 185-190.
- [4] 代显奇, 王军, 李占先, 等. 盾构隧道渗漏水病害成因与防治现状 [J]. 人民长江, 2022, 53(11): 186-192.  
DAI Xianqi, WANG Jun, LI Zhanxian, et al. Research on Current Situation of Causes and Prevention Measures of Water Leakage Diseases in Shield Tunnels[J]. Yangtze River, 2022, 53(11): 186-192.
- [5] 上海申通地铁集团有限公司. 地铁隧道工程盾构施工技术规范: DG/TJ08—2041—2008[S]. 上海: 同济大学, 2008: 81-83.  
Shanghai Shentong Metro Group Co., Ltd. Technical Specification for Shield Tunneling Construction in Subway Tunnel Engineering: DG/TJ08—2041—2008[S]. Shanghai: Tongji University, 2008: 81-83.
- [6] 国家铁路局. 铁路隧道设计规范: TB 10003—2016[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017: 45.  
National Railway Administration of People's Republic of China. Code for Design of Railway Tunnel: TB 10003—2016[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017: 45.
- [7] 中华人民共和国交通运输部. 公路隧道设计规范 第一册 土建工程: JTG 3370.1—2018[S]. 北京: 人民交通出版社, 2019: 10-12.  
Ministry of Transport of the People's Republic of China, Specifications for Design of Highway Tunnels Section 1 Civil Engineering: JTG 3370.1—2018[S]. Beijing: China Communications Press, 2019: 10-12.
- [8] 王烨晟, 陈文华, 吴勇, 等. 地铁盾构隧道结构安全评判指标体系及模型建设研究 [J]. 都市快轨交通, 2020, 33(6): 115-122.  
WANG Yesheng, CHEN Wenhua, WU Yong, et al. Establishment of a Safety Assessment Index System and Model for Shield Tunnels[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2020, 33(6): 115-122.
- [9] 陈君. 地铁盾构隧道结构安全评估方法研究 [J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(增刊1): 52-56.  
CHEN Jun. Study on Structural Safety Assessment Method of Subway Shield Tunnel[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(S1): 52-56.
- [10] 魏纲, 黄时雨, 洪文强. 运营地铁盾构隧道结构安全评价现状与展望 [J]. 现代隧道技术, 2018, 55(增刊2): 996-1003.  
WEI Gang, HUANG Shiyu, HONG Wenqiang. Present Situation and Prospect of Structural Safety Evaluation of Shield Tunnel in Operating Subway[J]. Modern Tunnelling Technology, 2018, 55(S2): 996-1003.
- [11] 贾博婷, 赵天威, 祝志川. 基于熵值修正G2赋权的综合评价方法及实证 [J]. 统计与决策, 2019, 35(8): 30-35.  
JIA Boting, ZHAO Tianwei, ZHU Zhichuan. Comprehensive Evaluation Method Based on Entropy Value Correction G2 Weighting and Its Empirical Analysis[J]. Statistics & Decision, 2019, 35(8): 30-35.

(责任编辑: 申剑)