

# 基于模糊评判法的城市轨道交通瓷绝缘子 剩余寿命评估方法<sup>\*</sup>

张贤玉

(轨道交通工程信息化国家重点实验室(中铁一院), 710043, 西安//高级工程师)

**摘 要** 某城市轨道交通接触网瓷绝缘子已运行近 40 年, 逐渐呈现故障率上升的趋势。该城市轨道交通运维部门提出了对绝缘子剩余寿命进行评估和制定维护策略的需求。根据该城市轨道交通线路不同运行年限绝缘子样本及评估要求, 制定了一套涵盖绝缘子表面退化、机械性能及电气性能在内的老化寿命试验方案, 并采用模糊评判法对试验数据进行分析, 得出城市轨道交通接触网瓷绝缘子的剩余寿命评估结果: 机械性能、表面退化及电气性能按权重顺序依次影响瓷绝缘子剩余运行寿命; 基于试验及模糊评价理论的剩余寿命评估方法能够评估瓷绝缘子的剩余寿命; 机械性能是影响瓷绝缘子运行的核心性能指标, 应对老旧瓷绝缘子机械性能进行定期检验, 并根据检验结果确定是否需要更换。

**关键词** 城市轨道交通; 接触网; 瓷绝缘子; 剩余寿命评估

**中图分类号** U226.8:U231;TM216.\*1

**DOI**:10.16037/j.1007-869x.2023.05.018

## Evaluation Method for Urban Rail Transit Porcelain Insulator Residual Life Based on Fuzzy Evaluation

ZHANG Xianyu

**Abstract** The porcelain insulators of an urban rail transit OCS (overhead catenary system) have been in service for almost 40 years, and are showing upward trend of failure rate. The urban rail transit operation and maintenance department has put forward a demand of evaluating the porcelain insulator residual life and developing maintenance strategy. According to the insulator samples of different service years and evaluation requirements of this urban rail transit line, an aging lifespan test plan for insulator surface degradation, electrical and mechanical performance is developed, and then the test data are analyzed using fuzzy evaluation method. Residual life evaluation results of the urban rail transit OCS porcelain insulators are obtained: mechanical performance, surface degradation and electrical performance affect the porcelain insulator residual life

by weight sequence; the residual life evaluation method which is based on test and fuzzy evaluation method can evaluate it for porcelain insulator properly; mechanical performance is the core performance index that affects porcelain insulator operation, and to carry out mechanical performance test on aging porcelain insulators at fixed period and then determine whether replacement is needed accordingly.

**Key words** urban rail transit; OCS; porcelain insulator; residual life evaluation

**Author's address** State Key Laboratory of Rail Transit Engineering Informatization (FSDI), 710043, Xi'an, China

绝缘子是影响城市轨道交通接触网安全运行的核心部件, 其可靠性直接受到大气环境影响。

根据电力系统运行经验和陶瓷材料的机械、物理特性, 瓷绝缘子一般具有极长的机械寿命及电气寿命; 不同于复合绝缘子, 其有较为明确的状态评估方法<sup>[1-2]</sup>。电力行业针对瓷绝缘子通常采用故障修的维护方案, 即坏一只换一只。城市轨道交通接触网瓷绝缘子的运行具有振动强度高、运行高度接近地面和需要穿越隧道等特点。因其运行环境远比通常的电力线路更为复杂、恶劣, 为此城市轨道交通对接触网绝缘子的可靠性提出了更高的要求。运维部门迫切需要掌握运行中的老旧瓷绝缘子剩余寿命信息, 以确定是否需要全部更换, 因此需要针对老旧线路的绝缘子制定一套切实可行的瓷绝缘子维护策略, 并以此为据进行评估工作。

目前, 针对瓷绝缘子的试验特性及其运行寿命的研究较少, 现有研究更多关注基于温度的红外检测、表面污秽、放电和机械破坏等独立试验。这无法对瓷绝缘子整体运行寿命状况进行评估。针对

<sup>\*</sup> 中国铁路总公司科研开发计划项目(2015T002-B)

城市轨道交通绝缘子的可靠性和剩余寿命的研究尚未能检索到相关文献。随着城市轨道交通运营年限的增加,城市轨道交通接触网中越来越多的异常瓷绝缘子被更换,于是利用更换的瓷绝缘子进行试验研究并寻找出适合的方法评估剩余寿命成为一种很好的应对策略。

本文首次针对某城市轨道交通接触网瓷绝缘子提出了一套剩余寿命评估方案:依据 IEC(国际电工委员会)标准,选取 3 组不同运行年限(投运时间为 1981 年、2003 年、2019 年)的腕臂瓷绝缘子样品进行材料表面退化、机械性能及电气性能综合试验;对试验结果进行分析评价并确定权重;基于模糊评判法计算分析,得出了该线路瓷绝缘子的剩余寿命,并提出了运维建议。

### 1 瓷绝缘子试验

#### 1.1 试验依据

城市轨道交通接触网瓷绝缘子承受的机械载荷主要为:列车振动、导线和腕臂自重、检修荷载、导线舞动及零部件温度循环应力等。此外,其还需耐受系统换相暂态过电压、雷电过电压等的冲击,长期运行后将逐渐出现表面退化或机械性能损伤等情况<sup>[3]</sup>。

电力行业架空输电线路瓷绝缘子通常仅进行离线抽样检测,通过对绝缘子运行状态及失效率数据进行分析,以判定绝缘子是否继续运行或需要更换同批次绝缘子。文献[4-5]抽样选取运行了 25~30 年的悬式瓷绝缘子,测试了其剩余机电强度,并分析了老化现象及失效机理。文献[6]对运行了 3~25 年的瓷绝缘子进行抽样检测,通过工频击穿电压试验、冲击击穿试验、机电破坏试验及材料微观分析试验等,获得绝缘子电气、机械特性及材料性能;通过抽样试验评估高压悬式瓷绝缘子机电性能并制定更换策略。

由于无通用的线路绝缘子剩余寿命评估试验方法可供借鉴,本文提出了通过检测城市轨道交通线路接触网绝缘子的表面退化、机械性能和电气性能等变化特征来综合评估其运行状态的策略,并基于试验结果和模糊评价法对该城市轨道交通线路接触网瓷绝缘子的剩余寿命进行了评估,获得了 3 种年限瓷绝缘子的剩余寿命。

#### 1.2 试验方法

抽样获得了运行起始时间分别为 1981 年、2003

年和 2019 年的接触网平腕臂、斜腕臂和回流线用 3 类瓷绝缘子,确定了绝缘子表面退化、电气性能和机械性能 3 类试验,共 13 个试验项目。瓷绝缘子剩余寿命评估试验方案如图 1 所示。

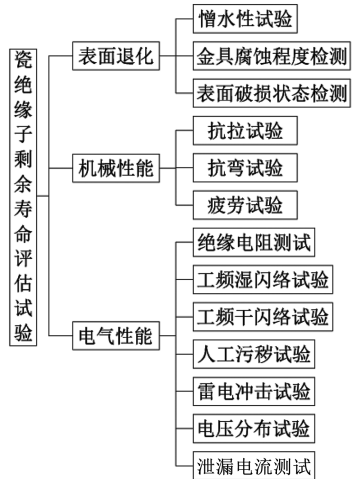


图 1 瓷绝缘子剩余寿命评估试验方案  
Fig. 1 Test plan of porcelain insulator residual life assessment

由于外绝缘试验数据具有分散性,选择 9 组同一年份、同一型号的腕臂用瓷绝缘子和回流线用瓷绝缘子,其中 7 个为一组,总计 63 个样品。腕臂用瓷绝缘子主要参数如表 1 所示,回流线用瓷绝缘子主要参数如表 2 所示。

表 1 腕臂用瓷绝缘子主要参数  
Tab. 1 Main parameters of cantilever porcelain insulator

试验	项目	出厂值
电气性能	冲击耐受电压	200 kV
	干耐受电压	110 kV
	湿耐受电压	110 kV
	爬电距离	1 130 mm
机械性能	拉伸失效载荷	81.70 kN(平腕臂用) 14.70 kN(斜腕臂用)
	弯曲失效载荷	5.00 kN(斜腕臂用)
	质量	17.24 kg(平腕臂用) 22.23 kg(斜腕臂用)

表 2 回流线用瓷绝缘子主要参数  
Tab. 2 Main parameters of return current line porcelain insulator

试验	项目	出厂值
电气性能	冲击耐受电压	75 kV
	干耐受电压	22 kV
	湿耐受电压	22 kV
	爬电距离	164 mm
机械性能	拉伸失效载荷	8.8 kN
	弯曲失效载荷	3.2 kN
	质量	4.4 kg

以相应的 IEC(国际电工委员会)标准规定的试验方法为依据进行各项试验。对于疲劳试验,其试验条件及试验方法参照 TB/T 2073—2020《电气化铁路接触网零部件技术条件》和 TB/T 2074—2020《电气化铁路接触网零部件试验方法》规定的腕臂整体疲劳方法进行:将平腕臂用绝缘子和斜腕臂用绝缘子与腕臂、承力索座等零件组装为一套完整的腕臂系统,按照实际工况在承力索座处施加载荷后再进行疲劳试验。瓷绝缘子疲劳试验方法如图 2 所示。

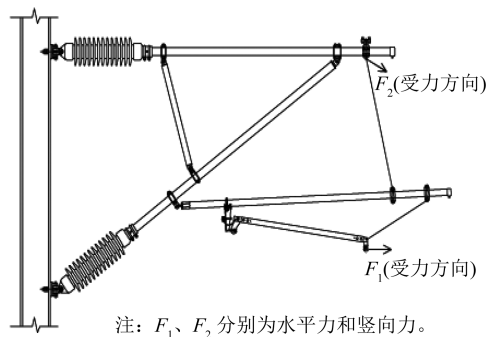


图 2 瓷绝缘子疲劳试验方法

Fig. 2 Fatigue test method of porcelain insulator

寿命评估需要获得试样的耐受极限指标。为节省试样,本文试验基于非破坏性-破坏性试验顺序原则进行。首先进行外观特性、锌层厚度和绝缘电阻率等基础试验项目;其次进行工频闪络与耐压、泄漏电流、雷电冲击和人工污秽等电气试验;最后进行机械性能试验。每组选择 4 个绝缘子进行抗拉及抗弯破坏试验,其余 3 个绝缘子进行疲劳试验。

以相关标准作为试验结果评判依据对试验数据进行分析。对于没有明确规定试验方法的试验项目,由国家认定的检验机构参照铁路标准,根据经验确定试验方法。对于标准中无明确规定试验结果是否合格的项目,按以下情况依次处理:①由检验机构依据经验判定;②由绝缘子出厂指标判定;③将试验数据输入到本文建立的评估模型中进行分析。

### 1.3 试验结果分析

#### 1.3.1 表面退化

1) 测量结果表明,所有样本釉面缺损依然符合标准要求。但试验结果显示,斜腕臂用瓷绝缘子釉面缺损随运行年限近似线性增长规律显著。分析认为,这是因为斜腕臂用瓷绝缘子更靠近机车,遭遇飞石飞溅等撞击频率较高,造成釉面缺损程度随运行时间而增长。

2) 瓷绝缘子金具镀锌层厚度随着运行年限有所增加,锌层厚度值有所下降。这表明其与运行年限存在较强的相关性,但依然满足标准(锌层厚度  $\geq 70 \times 10^{-6} \text{ m}$ )的要求。

#### 1.3.2 机械性能

1) 随着运行年限的增加,平腕臂用瓷绝缘子抗拉强度所有下降,其中 1981 年的样本组拉伸破坏负荷降幅最大,其最小值约为 61.59 kN。斜腕臂及回流线用瓷绝缘子抗弯强度试验结果分散性较大,未出现明显相关性。

2) 斜腕臂弯曲疲劳试验结果与运行年限存在一定相关性,其中 1981 年的样本组抗疲劳最小试验值为 5.04 kN,而新的绝缘子试验值最大为 6.04 kN。

3) 经疲劳试验后的机械破坏试验结果整体有所下降,但机械性能仍满足最大负载要求。

#### 1.3.3 电气性能

1) 绝缘电阻随运行年限增加,其电阻率先是快速下降,随后降速缓慢,但均远高于标准(电阻率  $\geq 300 \text{ M}\Omega$ )的要求。

2) 瓷绝缘子工频耐压试验后未出现闪络且击穿电压依旧远高于规定值;不同运行年限的腕臂用绝缘子闪络电压及回流线悬挂用绝缘子干耐受电压差异较小,闪络电压随运行时间无明显下降。全部样品均通过雷电冲击耐压试验,试验数据差异较小。

3) 1981 年的样本组绝缘子的表面泄露电流相对其他年份明显偏高;但不同类型、不同运行年限绝缘子的泄露电流依然符合标准的要求。

4) 2003 年、2019 年的样本组在人工污秽条件下的泄露电流高于清洁状态下的泄露电流;而 1981 年的样本组在人工污秽条件下的泄露电流低于清洁状态下的泄露电流。结合表面退化试验结果可知,长期运行工况对瓷绝缘子表面釉层会造成一定损伤,但是污秽程度造成绝缘子表面性能下降的原因却是绝缘子表面抗污能力的表现。

综上,瓷绝缘子电气性能劣化并不显著,机械性能下降明显但整体依然满足绝缘子较长一段时间的运行要求。本试验结果显示,绝缘子运行状态按机械性能、表面退化及电气性能权重顺序依次影响瓷绝缘子运行寿命。

## 2 瓷绝缘子剩余寿命评估

### 2.1 评估方法筛选

常用的绝缘子状态评估方法如表 3 所示。

表 3 常用的绝缘子状态评估方法

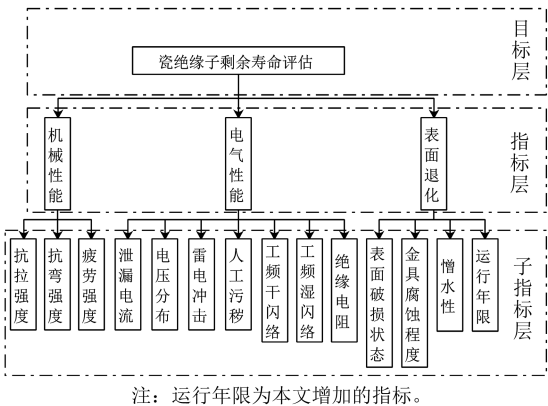
Tab.3 Condition evaluation method of commonly used insulator

评估方法	评估原理	特点
专家系统方法	一种基于知识推理的系统,通过获取大量领域内专家的知识,在此基础上进行推理从而得到问题的解答	在确认事实和建立规则时需要大量的实践经验,所以人为因素多一些
人工神经网络法	模拟人脑智能化处理的过程;人工神经网络具有自学习能力,通过学习或训练获取知识,并储存在神经元的权值中	需考虑各个指标间的相互关联关系,指标太多,模型过于复杂交错,分析困难;且需要大量样本训练网络
综合模糊评判法	利用模糊集和隶属度函数,建立模糊关系矩阵 $R$ ,采用定性与定量结合的方法,从多个方面对事物隶属等级状况进行整体评价	以模糊数学为基础,应用模糊关系合成原理,将一些边界不清、不宜量化的因素量化,从多个因素对被评事物隶属等级状况进行综合性评价

对于瓷绝缘子的表面退化、机械性能和电气性能等,某些试验项目(例如表面退化)难以量化,且另一些指标在比较时不易确定绝缘子优劣程度,存在一定模糊性。因此,本文基于试验数据特征选取综合模糊评判法进行瓷绝缘子剩余寿命评估。

2.2 综合模糊评判模型

综合模糊评判法主要是将模糊理论与层次分析法相结合,通过分析影响绝缘子状态的主要特征参量,建立多层次结构评估指标体系。综合模糊评判法分层指标体系如图 3 所示。



注：运行年限为本文增加的指标。

图 3 综合模糊法评判分层指标体系

Fig.3 Comprehensive fuzzy evaluation for layered index system

根据实际受力情况,平腕臂用瓷绝缘子选取抗拉强度和疲劳强度作为机械性能指标;斜腕臂用绝缘子选取抗弯强度和疲劳强度作为机械性能指标;回流线瓷绝缘子选取抗拉强度及抗弯强度作为机械性能指标。

首先运用层次分析法确定各指标权重,其次根据实际情况对指标权重进行调整,最后结合绝缘子表面退化、机械性能和电气性能等试验数据,利用模糊理论确定单因素各状态等级隶属度,并基于多级模糊评判算法进行模糊运算,综合得出瓷绝缘子剩余寿命评估值如图 4 所示。

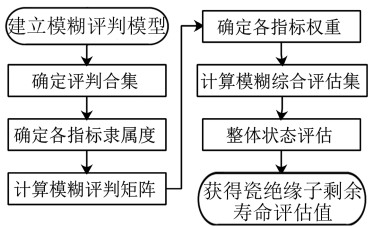


图 4 综合模糊评判法分析总体流程

Fig.4 Overall process of comprehensive fuzzy evaluation analysis

2.3 建立评判合集

将瓷绝缘子运行状态分为四级,即优良、一般、预警、更换。其中,优良表示绝缘子不存在劣化,可长期安全运行;一般表示绝缘子稍有劣化,但其基本性能在安全裕度内,可继续运行;预警表示某些状态反映绝缘子存在一定性能劣化,需定期巡检;更换表示绝缘子劣化严重,易发生故障,须密切关注并立即更换。

最终评判合集可表示为:  $V = \{v_1, v_2, \cdots, v_n\}$ , 元素  $v_i$  代表各种评估状态。

2.4 指标隶属度计算

在模糊综合评价中,因各子指标量纲不同,子指标值的数量级也不同,常导致得到的隶属度不符合实际情况。故在确定隶属函数前,需将定量指标数据进行量纲一化处理,具体方法为:

对越小越优型指标,计算式为:  $x_i = \left( \frac{c_{01} - c_e}{c_{01} - c_0} \right)^k$

对越大越优型指标,计算式为:  $x_i = \left( \frac{c_e - c_{01}}{c_0 - c_{01}} \right)^k$

式中:

- $x_i$ —— 因素  $i$  量纲一化值;
- $c_0$ —— 指标的最优值;
- $c_{01}$ —— 指标需要注意的值;
- $c_e$ —— 子指标  $e$  的实测值;
- $k$ —— 参数变化对劣化状态的影响程度,一般

取为 1。

对于评价因素隶属函数 $\mu(x)$ 的求取,通过量纲一化将各参数转化为 0~1 之间的函数,再选用半梯形和三角形的分布函数来确定隶属度。半梯形和三角隶属度函数分布如图 5 所示,隶属度计算式中表 4 所示。

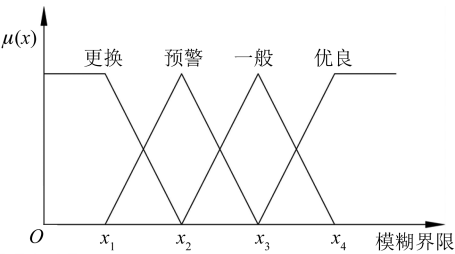


图 5 半梯形和三角隶属度函数分布

Fig. 5 Semi-trapezoidal and triangular membership function distribution

表 4 隶属度计算式

评估等级	隶属度函数
优良	$\mu_4(x) = \begin{cases} 0, & x < x_3 \\ \frac{x - x_3}{x_4 - x_3}, & x_3 \leq x < x_4 \\ 1, & x \geq x_4 \end{cases}$
一般	$\mu_3(x) = \begin{cases} 0, & x < x_2 \text{ 或 } x > x_4 \\ \frac{x - x_2}{x_3 - x_2}, & x_2 \leq x < x_3 \\ \frac{x_4 - x}{x_4 - x_3}, & x_3 \leq x < x_4 \end{cases}$
预警	$\mu_2(x) = \begin{cases} 0, & x < x_1 \text{ 或 } x > x_3 \\ \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}, & x_1 \leq x < x_2 \\ \frac{x_3 - x}{x_3 - x_2}, & x_2 \leq x < x_3 \end{cases}$
更换	$\mu_1(x) = \begin{cases} 1, & x < x_1 \\ \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1}, & x_1 \leq x < x_2 \\ 0, & x \geq x_2 \end{cases}$

2.5 建立模糊评判矩阵

模糊评判矩阵  $R$  是模糊计算的重要环节,由各子指标的隶属度函数构成:  $R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix}$ ,其中 $r_{ij}$ 为因素*i*对评判集中元素*j*的隶属度。

以平腕臂用瓷绝缘子为例,模糊评判矩阵由  $R_{\text{表面退化}}$  矩阵(含憎水性、金具腐蚀程度、表面破损状态和运行年限 4 个指标)、 $R_{\text{机械性能}}$  矩阵(含抗拉强度和疲劳强度 2 个指标)和  $R_{\text{电气性能}}$  矩阵(含绝缘电阻、工频湿闪络、工频干闪络、人工污秽、雷电冲击、泄漏电流和电场分布等 7 个指标)构成。

2.6 指标权重分析

各指标的权重是确定评估方法是否科学、合理的关键参数,直接影响评估结果的准确度。在模糊评判分析法中需通过建立各指标优先关系矩阵来计算各指标权重。本文采用九级标度法来确定优先关系矩阵。九级标度法权重划分如表 5 所示。

表 5 九级标度法权重划分

评估尺度 $f_{ij}$ 取值	含义
0.5	表示两个因素相比,具有相同重要性
0.6	表示两个因素相比,前者比后者稍微重要
0.7	表示两个因素相比,前者比后者明显重要
0.8	表示两个因素相比,前者比后者强烈重要
0.9	表示两个因素相比,前者比后者极端重要
0.1、0.2、0.3、0.4	反比较, $f_{ji} = 1 - f_{ij}$

采用九级标度法构建目标层及指标层的优先关系矩阵,目标层及指标层中指标相对权重的取值依据试验结果分析得出的各指标重要性获得。

目标层:

$$F_{\text{目标层}} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.6 & 0.6 \\ 0.4 & 0.5 & 0.5 \\ 0.4 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix}$$

指标层:

$$F_{\text{表面退化}} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.4 & 0.4 & 0.3 \\ 0.6 & 0.5 & 0.5 & 0.5 \\ 0.6 & 0.5 & 0.5 & 0.5 \\ 0.7 & 0.5 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix}$$

$$F_{\text{机械因素}} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 \\ 0.5 & 0.5 \end{bmatrix}$$

$$F_{\text{电气因素}} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.6 & 0.6 & 0.6 & 0.6 & 0.5 & 0.7 \\ 0.4 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.6 & 0.4 & 0.7 \\ 0.4 & 0.4 & 0.5 & 0.6 & 0.6 & 0.5 & 0.7 \\ 0.4 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.6 & 0.5 & 0.7 \\ 0.4 & 0.4 & 0.4 & 0.4 & 0.5 & 0.4 & 0.6 \\ 0.5 & 0.6 & 0.5 & 0.5 & 0.6 & 0.5 & 0.6 \\ 0.3 & 0.3 & 0.3 & 0.3 & 0.4 & 0.4 & 0.5 \end{bmatrix}$$

通过优先关系矩阵分别求得目标层及指标层

模糊一致矩阵： $A = (a_{ij})_{n \times n}^{[7]}$ ， $n \times n$  为矩阵维度， $n$  为自然数序列。利用关系排序法获得相应的指标层权重向量： $W = [w_1 w_2 \cdots w_m]$ ，其中  $w_i (i = 1, 2, \cdots, m)$  为目标层及指标层各因素相应的权重，权重满足量纲一化的要求： $\sum_{i=1}^m w_i = 1$ 。以平腕臂用绝缘子为例，最终求得各层指标权重如表 6 所示。

表 6 平腕臂用绝缘子各指标权重

Tab. 6 Index weight of steady arm insulator

指标层	权值	子指标层	权重
表面退化	0.356	憎水性	0.225
		金具腐蚀程度	0.256
		表面破损状态	0.256
		运行年限	0.263
机械性能	0.322	平腕臂抗拉	0.500
		平腕臂疲劳	0.500
电气性能	0.322	绝缘电阻	0.155
		工频湿闪络	0.145
		工频干闪络	0.147
		人工污秽	0.147
		雷电冲击	0.135
		泄露电流	0.149
		电压分布	0.122

结果表明，机械性能在确定腕臂用瓷绝缘子剩余寿命的诸项指标中占有最大权重，电压分布占有最小权重。

2.7 模糊综合评估集的计算及整体状态评估

模糊综合评估集  $B$  用于将各指标层权重和相应的隶属度函数结合： $B = W \cdot R = (b_1, b_2, \cdots, b_n)$ ，其中  $b_i (i = 1, 2, \cdots, n)$  为评估对象  $i$  对评判集中第  $j$  个元素的隶属度。

瓷绝缘子整体状态评估隶属度向量  $S$  为目标层权重向量  $W$  与模糊综合评估集  $B$  相乘：

$$S = W_{\text{目标层}} \times \begin{bmatrix} B_{\text{表面退化}} \\ B_{\text{机械性能}} \\ B_{\text{电气性能}} \end{bmatrix}$$

采用加权平均法量化处理评判合集得到： $V = [1 \ 2 \ 3 \ 4]$ ，合集中元素分别代表更换、预警、一般、优良的秩，则绝缘子最终的状态隶属度为： $L = S \cdot V^T$ 。

以 50 年为寿命评判基准，最终获得 3 种瓷绝缘子的剩余寿命评估结果，如表 7 所示。由表 7 可知，接触网瓷绝缘子运行寿命接近 50 年，而斜腕臂用瓷绝缘子剩余寿命最短，回流线用瓷绝缘子剩余寿命

最长。这符合斜腕臂受力最严重（压应力+弯曲应力），回流线用绝缘子受力最小、电压最低的规律。从安全可靠运行角度可确定，1981 年投入运行的腕臂用绝缘子实际剩余寿命大于 10 年，2003 年投入运行的腕臂用绝缘子剩余寿命大于 15 年。

表 7 3 种瓷绝缘子剩余寿命评估值

Tab. 7 Residual life evaluation for three types of porcelain insulators

绝缘子类型	投入运行年份	剩余寿命/年
平腕臂用	1981	16.8
	2003	24.2
	2019	49.0
斜腕臂用	1981	14.8
	2003	18.1
	2019	49.0
回流线用	1981	20.3
	2003	24.2
	2019	49.0

注：上述剩余寿命计算均以 2019 年为参照。

3 结语

1) 试验表明，所评估的 3 种运行年限的城市轨道交通接触网瓷绝缘子电气性能劣化较少；机械性能下降明显但整体依然满足绝缘子继续较长时期运行要求；表面退化各指标亦有不同程度下降。机械性能、表面退化及电气性能依次按权重影响瓷绝缘子运行状态。

2) 结合对不同运行年限样本的全面试验，特别是抗拉强度、抗弯强度、电气性能等极限指标的变化趋势，采用模糊数学评判方法评估瓷绝缘子的剩余寿命，可得到较为合乎实际、科学的评估结果。

3) 已运行 40 年的城市轨道交通接触网瓷绝缘子样本各方面性能仍能满足较长时期运行要求，这与国内外行业普遍认为的高压电力线路绝缘子理论寿命大于 50 年基本一致<sup>[8]</sup>。研究结果也表明，虽然城市轨道交通绝缘子运行环境远较通用中高压线路绝缘子恶劣，但城市轨道交通瓷绝缘子实际寿命与普通电力线路绝缘子相比并无明显差异。

4) 机械性能试验中，绝缘子抗拉及抗弯极限强度分散性较大，故在破坏强度平均值不高的情况下，破坏强度的保证水平也不高，表明绝缘子破坏强度的安全系数较小。显示该批瓷绝缘子的机械性能退化严重，这与运行年限呈现弱相关性。因此，建议将瓷绝缘子机械性能试验，尤其是抗弯强

(下转第 104 页)

站的布置方式、隧道洞室结构、消防安全,以及周围环境优化等因素,分别对区间箱式变电站设于高架桥下、区间箱式变电站与雨水泵房合建、区间箱式变电站设于隧道口上方以及区间箱式变电站设于 U 槽敞开段两线间,这 4 种布置方案的投资成本、消防安全等进行比选,并分析其优缺点。针对性地提出区间不同过渡段的最优方案,其中:过渡段 1 采用方案 2;过渡段 2、3 采用方案 2 与方案 4 的结合;过渡段 4 采用方案 4。本文为箱式变电站在市域铁路区间桥隧过渡段的布置设计提供了参考。

市域铁路作为市域交通,沿线构筑物多、建设运营环境复杂,通过合理布设可进一步推广箱式变电站在市域铁路中的应用。

## 参考文献

- [1] 杜沛生. 箱式变电站运行存在的问题及维护措施研究[J]. 低碳世界,2022,12(4): 34.
- DU Peisheng. Research on the problems existing in the operation of box-type substation and its maintenance measures[J].

Low Carbon World,2022,12(4): 34.

- [2] 朱唯耀. 有轨电车箱式变电站小型化设计及其应用[J]. 城市轨道交通研究,2021,24(增刊2): 61.
- ZHU Weiyao. Design and application of miniaturized tram box substation[J]. Urban Mass Transit,2021,24(S2): 61.
- [3] 喻奇. 箱式直流牵引变电站在城际轨道交通中的应用[J]. 城市轨道交通研究,2020,23(8): 177.
- YU Qi. Application of E-house DC traction substation in inter-city rail transit[J]. Urban Mass Transit,2020,23(8): 177.
- [4] 赵晨. 箱式变电站在城市轨道交通中的实际应用[J]. 电气时代,2020(12): 55.
- ZHAO Chen. Practical application of box-type substation in urban rail transit[J]. Electric Age,2020(12): 55.
- [5] 王东林. GB 51348—2019《民用建筑电气设计标准》: 建筑电气绿色设计部分条款解读[J]. 智能建筑电气技术,2021,15(5): 7.
- WANG Donglin. Standard for electrical design of civil building (GB 51348—2019)—interpretation of some clauses of building electrical green design[J]. Electrical Technology of Intelligent Buildings,2021,15(5): 7.

(收稿日期:2023-01-13)

(上接第 99 页)

度试验作为剩余寿命的首要评估指标。其次,在实际考核中应增加不同批次、不同工况下绝缘子样本的采集数量。一旦试验结果不达标,建议对未达标绝缘子批次重新取样,进一步用试验验证是否需要立即更换。

## 参考文献

- [1] CHEN C, JIA Z, YE W A, et al. Condition assessment strategies of composite insulator based on statistic methods[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(6): 3231.
- [2] NING M, LIU Q, YU X, et al. The comprehensive assessment of composite insulator aging condition[C]//2015 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT). Changsha: IEEE, 2016: 1472.
- [3] 梁英,郭兴五. 基于 FTIR 的硅橡胶绝缘材料的老化程度评估[J]. 高压电器,2015,51(8): 62.
- LIANG Ying, GUO Xingwu. Aging condition assessment of silicone rubber for composite insulators based on FTIR[J]. High Voltage Apparatus,2015,51(8): 62.

- [4] MISHRA A P, GORUR R S, VENKATARAMAN S, et al. Condition assessment of porcelain and toughened glass insulators from residual strength tests[C]//2006 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Kansas City, MO: IEEE, 2007: 413.
- [5] MISHRA A P, GORUR R S. Investigation of electrical failures in porcelain cap and pin line insulators[C]//2007 Annual Report-Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Vancouver, BC: IEEE, 2008: 95.
- [6] CHERNEY E A, BAKER A C, KUFFEL J, et al. Evaluation of and replacement strategies for aged high voltage porcelain suspension-type insulators[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(1): 275.
- [7] 张吉军. 模糊层次分析法(FAHP)[J]. 模糊系统与数学, 2000,14(2): 80.
- ZHANG Jijun. Fuzzy analytical hierarchy process[J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 2000,14(2): 80.
- [8] 胡毅. 送电线路绝缘子运行性能及分析[J]. 高电压技术, 2001,27(2): 33.
- HU Yi. The analysis of characteristics of porcelain insulator, glass insulator and composite insulator in transmission line[J]. High Voltage Engineering,2001,27(2): 33.

(收稿日期:2022-06-16)