



基于老化试验与主成分分析法的 动车组避雷器老化寿命研究

李英¹, 宋彦君¹, 徐玉琦², 刘凯², 陈奎², 高国强²
(1. 中车唐山机车车辆有限公司, 河北唐山 063035;
2. 西南交通大学电气工程学院, 四川成都 611756)

摘要: 车载避雷器是保障高速动车组安全运行的重要设备。文章以动车组车载避雷器为研究对象, 通过对不同运营里程和不同运营时间的避雷器进行性能试验和老化试验(热-电老化、冲击老化和高次谐波老化), 研究避雷器的老化特性及性能参数的变化规律, 评估车载避雷器的可靠性和使用寿命; 利用主成分分析法, 建立车载避雷器老化寿命模型。研究结果显示, 避雷器5项性能参数的失效阈值经标准化处理后计算出的评价值为82, 即全新车载避雷器可运行750万km。该研究可为后续避雷器的使用提供技术支持, 优化避雷器运营维护及检修限度, 以提高避雷器的可靠性水平。

关键词: 高速动车组; 避雷器; 老化试验; 主成分分析法; 寿命预测

中图分类号: U266.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-128X(2024)05-0174-07

0 引言

动车组避雷器的主要作用是限制来自线路的雷电过电压或由操作引起的内部过电压, 保护电气设备的绝缘免受过电压损害。它是确保动车组电力系统安全运行的重要保护设备之一, 其整体性能的稳定性直接关系到动车组能否安全运行。动车组高速运行、频繁振动、紧急制动所带来的机械冲击, 以及气流、海拔落差和温度变化等因素的综合影响, 使得对避雷器在高速铁路中的性能要求更加严格^[1-2]。目前车载避雷器采用的多为无间隙氧化锌避雷器, 在过电压动作后, 无间隙氧化锌避雷器不存在工频续流现象, 保护效果好。

车载避雷器的保护水平完全由氧化锌(ZnO)压敏电阻的残压所决定, 这样可以避免间隙放电特性变化对其产生的影响^[3]。车载避雷器事故主要是由ZnO压敏电阻的老化引起的。因为没有串联间隙, ZnO压敏电阻需要承受雷电过电压、操作过电压、工频过电压和

持续运行相电压的作用, 这将导致ZnO压敏电阻老化。老化后, ZnO压敏电阻会出现电气性能指标劣化, 包括压敏电压降低、泄漏电流增大, 以及阻性电流、功率损耗和介电损耗等参数的明显增加, 这使得避雷器阀片温度升高, 可能导致热崩溃^[4-5]。ZnO避雷器的老化程度与运行时间呈正相关, 运行时间越长, 老化程度越严重。当遭受雷电或其他暂态过电压注入时, 避雷器的瞬时发热量可能超过其散热能力, 导致热破坏的发生^[6]。避雷器劣化失效会影响列车安全运行, 带来巨大的安全隐患。因此, 研究动车组避雷器老化特性, 探寻其与性能参数的关系, 这对保障动车系统安全可靠运行具有重要的理论意义和实际意义。

文献[7]研究了雷电冲击下的避雷器老化特性。文献[8]提出了基于不同算法的避雷器状态评估方法。文献[9]研究了不同频率谐波电压作用下车载避雷器的老化特性, 并提出避雷器泄漏电流评估模型。文献[10]研究了多种电气参数与车载避雷器可靠性的对应关系。文献[11]研究了潮湿程度对车载避雷器电气参数的影

基金项目: 国家自然科学基金项目(52377161)

通信作者: 刘凯, 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事电力系统及电气化铁路设备状态检测方面的研究; E-mail: liukai@swjtu.edu.cn

引用格式: 李英, 宋彦君, 徐玉琦, 等. 基于老化试验与主成分分析法的动车组避雷器老化寿命研究[J]. 机车电传动, 2024(5): 174-180.DOI:

10.13890/j.issn.1000-128X.2024.05.023.

Citation: LI Ying, SONG Yanjun, XU Yuqi, et al. Study of aging life for EMU arresters based on aging tests and principal component analysis method

[J]. Electric drive for locomotives, 2024(5): 174-180.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2024.05.023.

响。目前的研究均未提出车载避雷器寿命评估模型。

本文选取不同运营里程及不同运营时间的CRH5系列动车组避雷器进行性能试验, 并根据试验结果绘制性能参数变化曲线进行寿命研究; 总结避雷器性能随服役时间的变化规律, 研究高次谐波对避雷器老化的影响, 对比2种物料避雷器性能; 基于主成分分析法, 评估避雷器长期服役后的运用可靠性, 得到动车组避雷器的使用寿命评估模型。

1 老化试验

依据GB/T 11032—2020标准以及相关文献, 选取不同运营里程及不同运营时间的车载避雷器进行试验。首先对其进行外观检测、绝缘电阻试验、工频参考电压试验、直流参考电压试验、0.75倍直流参考电压下泄漏电流试验、持续电流试验、密封性能试验; 然后进行循环老化试验, 在老化试验单周期内可进行热-电老化试验、冲击老化试验、谐波老化试验。

① 热-电老化: 基于标准和实际运行环境设计了热-电老化试验, 施加电压为34 kV, 温度为115 °C, 每个周期的持续时间为150 h。

② 冲击老化: 根据标准要求, 选择标称放电电流幅值为10 kA的负极性冲击电流, 对整只42 kV金属氧化物避雷器进行雷电冲击残压试验。在试验中, 采用了雷电波(8/20 μs)的冲击方式。每次冲击之间的间隔为2 min, 每3次冲击之间的间隔为5 min。每周期总共进行18次冲击。

③ 高次谐波老化: 选取5%基波幅值、50次基波频率的高频电压源与37 kV工频电压源进行电压叠加, 模拟网压谐波对避雷器进行电老化, 每个周期的持续时间为150 h。

每轮老化试验之后需要依次进行表1所示试验项目, 测试避雷器老化后的性能。

表1 动车组避雷器老化性能试验

Tabel 1 Aging performance test of EMU arrester

项目编号	试验项目
1	外观检查
2	绝缘电阻试验
3	直流参考电压试验
4	0.75倍直流参考电压下泄漏电流试验
5	工频参考电压试验
6	持续电流试验
7	密封性能试验

本文所使用产品为交流无间隙金属氧化物避雷器, 避雷器规格型号为YH10WT-42/105, 爬电距离为1360 mm, 结构高度为650±5 mm, 伞径为175/145 mm, 质量为15 kg。试验选用2种物料号的避雷器产品, 其中物料1产品新造4根, 三级修4根, 四级修2根; 物料2

产品新造3根, 三级修4根, 2种合计共17根避雷器。根据CRH5动车组检修标准, 三级修检修周期为120万km, 四级修检修周期为240万km。

试验设计以下2种老化方案:

方案1: 根据不同物料号与修程选择10根避雷器依次进行热电老化、冲击老化与谐波老化。试验物料1依次编号为新造1-1, 新造1-2, 三级1-1, 三级1-2, 四级1-1, 四级1-2; 物料2依次编号为新造2-1, 新造2-2, 三级2-1, 三级2-2。

方案2: 根据不同物料号与修程选择7根避雷器依次进行热电老化与冲击老化。试验物料1依次编号为新造1-3, 新造1-4, 三级1-3, 三级1-4; 试验物料2依次编号为新造2-3, 三级2-3, 三级2-4。

2 试验分析

2.1 失效判定条件

根据相关标准和避雷器生产厂家标准, 当避雷器指标符合以下任意一条时, 即处于完全损坏的状态:

- ① 绝缘电阻小于1 GΩ;
- ② 直流参考电压小于58 kV;
- ③ 0.75倍参考电压下的泄漏电流大于50 μA;
- ④ 工频参考电压小于42 kV;
- ⑤ 持续运行电压下阻性电流大于200 μA。

2.2 含谐波老化试验分析

① 绝缘电阻: 3种修程的物料1避雷器老化后绝缘电阻变化如图1所示, 2种修程的物料2避雷器老化后绝缘电阻变化如图2所示。从图可以看出, 新造避雷器在9个周期后完全失效, 三级修与四级修避雷器分别在8、7个老化周期后完全失效。避雷器性能在前4个老化周期变化不明显, 绝缘电阻在4个周期前几乎没有下降, 而在后2个周期避雷器绝缘电阻迅速下降了50%, 在这2个周期内避雷器的绝缘电阻下降到了标准值以下。

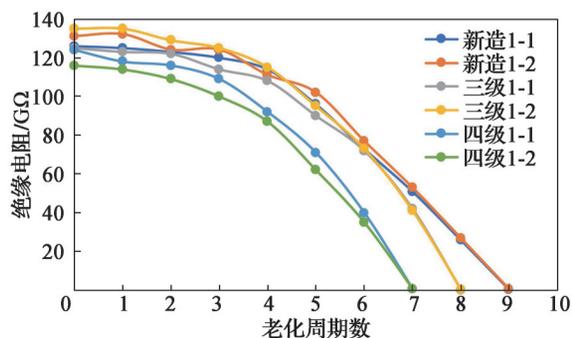


图1 3种修程物料1避雷器老化后绝缘电阻

Fig. 1 Insulation resistance of aged arrester of material 1 for 3 classes of repair

② 直流参考电压: 3种修程的物料1避雷器老化后直流参考电压变化如图3所示, 2种修程的物料2避雷器老化后直流参考电压变化如图4所示。2种物料在前

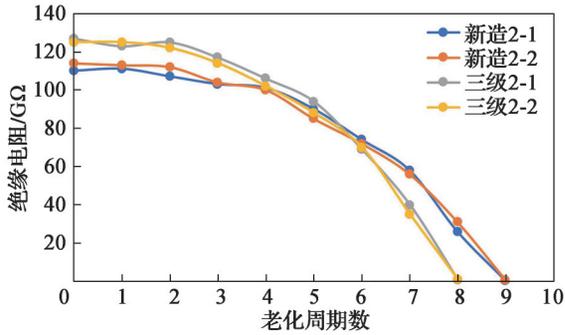


图2 2种修程物料2避雷器老化后绝缘电阻
Fig. 2 Insulation resistance of aged arrester of material 2 for 2 classes of repair

4个老化周期性能都无明显变化,从第5个老化周期后性能开始快速下降。这是因为老化前期,避雷器内部缺陷发展较慢;老化后期,避雷器内部缺陷发展加速。比较不同物料号避雷器直流参考电压变化,可得2种物料号的避雷器直流参考电压性能没有明显优劣,相对来说,物料2的避雷器性能更稳定。

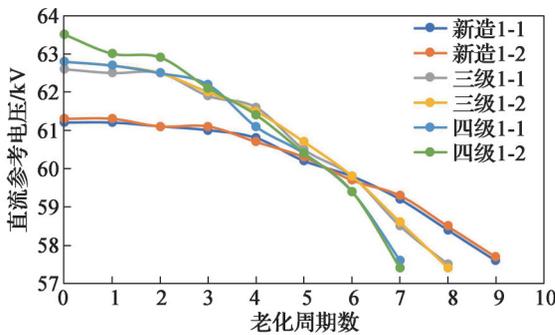


图3 3种修程物料1老化后直流参考电压变化
Fig. 3 DC reference voltage change of aged arrester of material 1 for 3 classes of repair

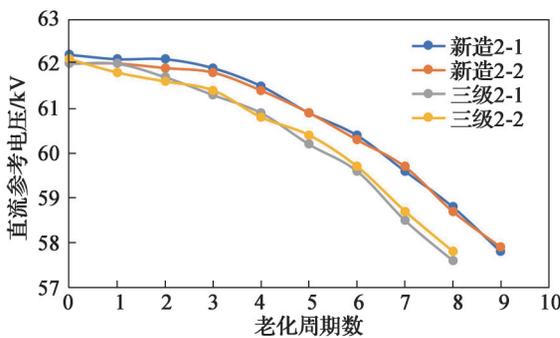


图4 2种修程物料2老化后直流参考电压变化
Fig. 4 DC reference voltage change of aged arrester of material 2 for 2 classes of repair

③ 0.75倍参考电压下的泄漏电流:3种修程的物料1避雷器老化后泄漏电流变化如图5所示,2种修程的物料2避雷器老化后泄漏电流变化如图6所示。2种物料在前4个老化周期性能都没有明显变化,从第5个老化周期开始泄漏电流快速上升。从整体上看,随着老化次数的增加,避雷器泄漏电流大小呈指数上升。比较不同物料号避雷器泄漏电流变化,可得物料号2的新

造与三级修避雷器的0.75倍直流参考电压下泄漏电流较物料号1的性能更优异。

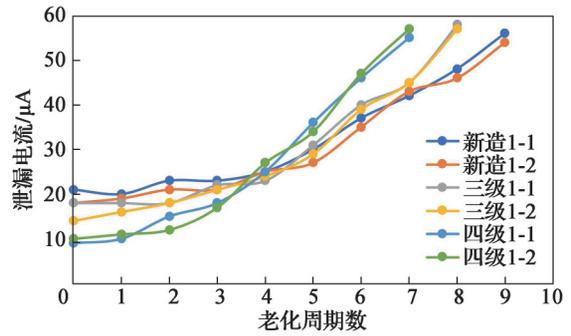


图5 3种修程物料1老化后泄漏电流
Fig. 5 Leakage current of aged arrester of material 1 for 3 classes of repair

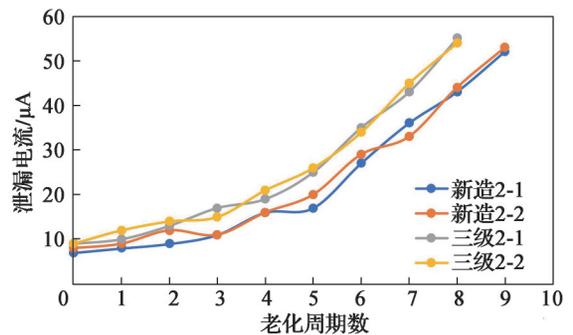


图6 2种修程物料2老化后泄漏电流
Fig. 6 Leakage current of aged arrester of material 2 for 2 classes of repair

④ 避雷器工频参考电压:3种修程的物料1避雷器老化后工频参考电压变化如图7所示,2种修程的物料2避雷器老化后工频参考电压变化如图8所示。2种物料在前4个老化周期性能都没有明显变化,从第5个老化周期开始工频参考电压快速下降,在老化后期,工频参考电压下降剧烈,很快下降到初始值的50%以下。比较不同物料号避雷器工频参考电压变化,可得2种物料号的避雷器工频参考电压性能没有明显优劣,相对来说,物料2的性能更稳定。

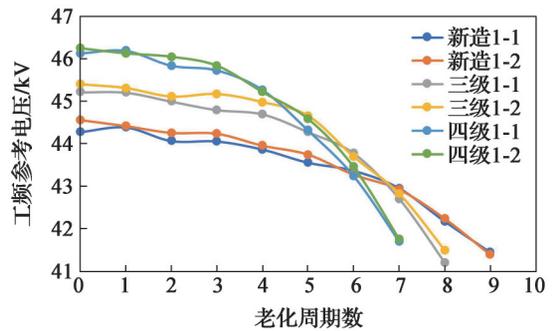


图7 3种修程物料1老化后工频参考电压
Fig. 7 Power frequency reference voltage of aged arrester of material 1 for 3 classes of repair

⑤ 持续运行电压下阻性电流:3种修程的物料1避雷器老化后的阻性电流分量变化如图9所示,2种修程

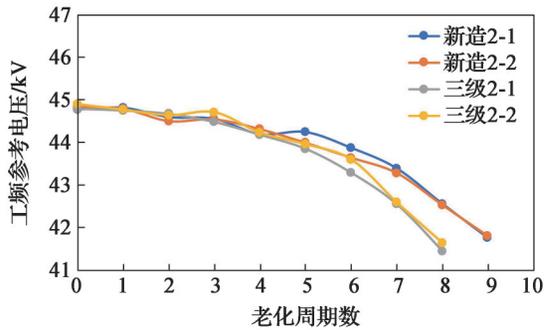


图8 2种修程物料2老化后工频参考电压

Fig. 8 Power frequency reference voltage of aged arrester of material 2 for 2 classes of repair

的物料2避雷器老化后的阻性电流分量变化如图10所示。2种物料在前4个老化周期阻性电流都没有明显变化,从第5个老化周期开始阻性电流快速上升,从整体上看,随着老化次数的增加,避雷器阻性电流分量大小呈指数上升。比较不同物料号避雷器阻性电流分量变化,可得物料2的新造与三级修避雷器的持续运行电压下阻性电流较物料1的性能更优异。

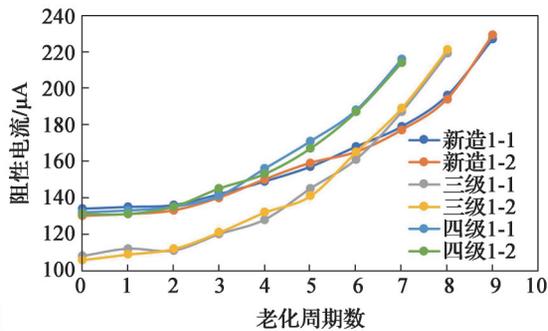


图9 3种修程物料1老化后阻性电流

Fig. 9 Resistive current of aged arrester of material 1 for 3 classes of repair

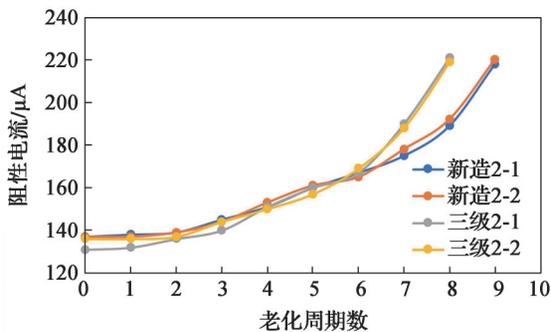


图10 2种修程物料2老化后阻性电流

Fig. 10 Resistive current of aged arrester of material 2 for 2 classes of repair

2.3 谐波老化对参数劣化的影响规律

按方案2开展试验,与方案1进行对比,观察谐波老化对绝缘电阻、直流参考电压、0.75倍直流参考电压下泄漏电流、工频参考电压与持续运行电压下阻性电流分量5项指标的影响。计算2种试验条件下老化周期差值,如表2所示,可得谐波老化会使物料1新造避

雷器老化时间减少1.07个周期,物料2新造避雷器老化时间减少1.05个老化周期;物料1三级修避雷器老化时间减少0.83个周期,物料2四级修新造避雷器老化时间减少0.77个老化周期;物料1三级修避雷器较新造避雷器老化时间减少0.24个周期;物料2三级修避雷器较新造避雷器老化时间减少0.28个周期。表明物料2避雷器较物料1避雷器抗谐波老化能力更好。

表2 是否含有谐波老化条件下参数失效的老化周期差值

Table 2 Difference in aging cycles for parameter failure with or without harmonic aging effects

避雷器	绝缘电阻	直流参考电压	泄漏电流	工频参考电压	阻性电流分量	平均值
新造1	1.00	0.76	1.42	1.38	0.82	1.07
新造2	1.26	0.65	0.77	1.53	1.04	1.05
三级1	1.07	0.28	1.22	1.05	0.54	0.83
四级2	1.13	0.81	0.68	0.84	0.41	0.77

2.4 避雷器运行里程与老化周期关系

由分析可知,不同修程与不同物料的避雷器老化失效周期均有差异。为了解避雷器的不同修程、不同物料与老化周期之间的对应关系,针对避雷器各项性能参数随老化周期的变化曲线做多项式拟合,求得各避雷器样本性能参数的失效周期如表3所示。

表3 不同避雷器样本性能参数老化失效时的周期数

Table 3 Number of cycles at aging failure of performance parameters for different arrester samples

避雷器	绝缘电阻	直流参考电压	泄漏电流	工频参考电压	阻性电流分量	平均值
新造1	8.91	8.59	8.32	8.32	8.05	8.44
新造2	9.07	8.68	8.43	8.46	8.12	8.55
三级1	8.10	7.53	7.35	7.62	7.40	7.60
三级2	8.07	7.72	7.61	7.64	7.36	7.68
四级1	7.03	6.79	6.43	6.91	6.46	6.72

由表3可得,物料1三级修避雷器较新造避雷器老化时间减少0.84个周期,物料2三级修避雷器较新造避雷器老化时间减少0.87个周期,物料1四级修避雷器较新造避雷器老化时间减少1.71个周期。可得出物料2三级修避雷器对应的老化周期更长,这与谐波分析中物料2避雷器较物料1性能更优异的结论相一致;而不同修程避雷器与总体老化周期数的差异略大,这可能是由避雷器性能参数老化曲线非线性变化引起的,在老化初期避雷器性能参数几乎没有明显变化,而老化后期避雷器参数均出现快速的升高或降低。

3 寿命评估

3.1 评估方法及原理

主成分分析 (Principal Component Analysis, PCA)

是一种常用的数据降维技术和特征提取方法。它通过对数据进行线性变换,将 p 个原始数据映射到一组新的正交变量上,这些新变量被称为主成分^[12]。主成分分析是设法将原来众多具有一定相关性的指标,重新组合成一组新的互相无关的综合指标来代替原来的指标。PCA的目标是通过最大化投影后的数据方差来获取主成分^[13]。第1个主成分 F_1 是数据中方差最大的方向,第2个主成分 F_2 是与第1个主成分正交且方差第2大的方向, F_1 和 F_2 之间的协方差为零,即 $\text{Cov}(F_1, F_2)=0$ 。依此类推,通过选择前 m 个主成分,可以实现在数据降维的同时保留尽可能多的信息。可观测随机变量 X 的协方差矩阵 Σ 的主对角元素 $\sigma_{11}, \dots, \sigma_{pp}$ 分别是 X 各分量 X_1, \dots, X_p 的方差。因为主成分分析是用方差来度量一个随机变量所含的信息量,所以协方差矩阵 Σ 的主对角元素之和 $\sum_{i=1}^p \sigma_{ii}$ 就刻画了原 p 个变量 X_1, \dots, X_p 所携带的信息总量。由矩阵的迹的性质有

$$\sum_{i=1}^p \sigma_{ii} = \text{tr} \Sigma = \lambda_1 + \dots + \lambda_p \quad (1)$$

式中: $\sum_{i=1}^p \sigma_{ii}$ 为协方差矩阵主对角元素之和; λ 为协方差矩阵的特征值。

该等式表明,原 p 个变量 X_1, \dots, X_p 所携带的信息之和 $\sum_{i=1}^p \sigma_{ii}$ 等于 p 个主成分 F_1, \dots, F_p 所携带的信息之和 $\sum_{i=1}^p \lambda_i$ 。因此,比值 $\lambda_j / \sum_{i=1}^p \lambda_i$ 表示第 j 个主成分 F_j 提取的信息量在总信息量中的比例,该比例被称为第 j 个主成分的贡献率。贡献率越大,可以认为第 j 个主成分的综合能力越强。前 m 个主成分的贡献率之和 $\sum_{i=1}^m \lambda_i / \sum_{i=1}^p \lambda_i$ 被称为前 m 个主成分 F_1, \dots, F_p 的累积贡献率。在实际应用中,只要累积贡献率 $\sum_{i=1}^m \lambda_i / \sum_{i=1}^p \lambda_i$ 大于85%,就可以认为前 m 个主成分已经综合了原始数据中大部分的信息。为了避免过多的主成分,不再提取新的主成分,以保持适当的主成分数量。在实际问题中,原始 p 个变量可能具有不同的量纲,导致变量的单位无法统一。这种不同量纲的选择可能导致方差之间存在巨大差异,从而影响主成分分析的结果。在进行主成分分析时, (X_1, \dots, X_p) 的协方差矩阵 Σ 会倾向于过多关注方差较大的变

量,而忽略方差较小的变量,这可能导致不合理的主成分分析结果^[14]。为了避免这种情况,通常会对各个变量进行标准化处理。通过标准化确保每个变量的方差相对均衡,从而获得更合理的主成分分析结果^[15]。

为了得到较为准确的主成分指标,将含谐波老化试验所得的绝缘电阻、直流参考电压、工频参考电压、0.75倍直流电压下的漏电流、泄漏电流阻性分量标准化处理后作为输入数据,进行避雷器老化样本数据的主成分提取分析,如表4所示。

表4 各主成分信息贡献率

Table 4 Information contributions of principal components

主成分	贡献率		
	特征值	方差/%	累积方差/%
1	4.969 9	99.398	99.398
2	0.023 4	0.468	99.866
3	0.004 3	0.086	99.952
4	0.001 7	0.034	99.986
5	0.000 7	0.014	100.000

由表4提取得到的各主成分贡献率可知,第一主成分的信息贡献率达到了99.398%。因主成分的累积贡献率已经超过了85%,可以得出结论,提取的第一主成分已经包含了可观测变量的大部分信息。因此,选择第一主成分进行避雷器寿命的分析。第一主成分对应的单位特征向量 l_1 为

$$l_1 = (-0.4476, -0.4482, 0.4469, -0.4474, 0.4460) \quad (2)$$

3.2 寿命预测

在避雷器老化过程中,绝缘电阻、直流参考电压、0.75倍直流电压下的漏电流、工频参考电压与泄漏电流阻性分量中任意一项下降到阈值以下都会导致避雷器失效,因此需要根据避雷器在不同老化条件下的拟合曲线,选择使避雷器失效的里程最小值来判断避雷器的使用寿命。将不同参量与运行里程按式(3)的双指数曲线拟合,得到拟合结果如表5所示。

$$f(x) = a \cdot e^{bx} + c \cdot e^{dx} \quad (3)$$

式中: a, b, c, d 为双指数曲线拟合参数。

绝缘电阻、泄漏电流阻性分量等5个随机变量 $(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5)$ 可基于拟合曲线表示为 $[f_1(x), f_2(x), f_3(x), f_4(x), f_5(x)]$,即

$$F = l_1 X \quad (4)$$

表5 随机变量双指数曲线拟合参数

Table 5 Parameters of dual-exponential curve fitting for random variables

参数	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
a	-13 100 000	-0.000 126 0	6.265 000	-0.154 500 00	128.800 000
b	0.001 207	0.000 413 4	-0.006 306	0.003 907 00	0.000 355
c	13 100 000	0.000 127 0	13.450 000	44.580 000 00	0.384 600
d	0.001 207	0.000 411 4	0.001 874	-0.000 006 39	0.006 651

式中: l_1 为第一主成分对应的单位特征向量, X 为 $[f_1(x), f_2(x), f_3(x), f_4(x), f_5(x)]$ 组成的矩阵。

得出基于主成分分析的避雷器寿命预测曲线为

$$f(x) = 18.78 \times e^{-0.001248x} - 0.4825 \times e^{0.005648x} \quad (5)$$

由式(5)可得避雷器寿命预测曲线如图11所示, 图中横坐标表示避雷器运行里程, 纵坐标是由避雷器5项性能参数基于主成分分析方法提取出的寿命评价价值, 经过标准化处理后设定综合性指标最大值为100, 可用于评估避雷器的运行状态。由避雷器5项性能参数失效阈值经过标准化处理后计算出的评价价值为82, 可知本文所述全新车载避雷器可运行750万km。

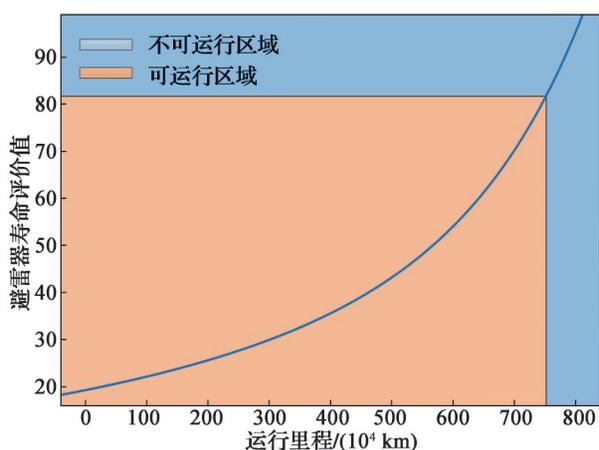


图11 避雷器寿命预测曲线

Fig. 11 Surge arrester life prediction curve

4 结论

本文的研究结论如下:

① 避雷器电气特征参量总劣化速率是逐渐增加的; 避雷器性能会在老化的第4个周期左右出现明显下降, 且高次谐波电压会加速避雷器老化。

② 基于对避雷器样品老化试验数据的分析, 可知不同物料在各项性能指标表现上各有优劣, 总体分析, 物料2避雷器性能更优异。

③ 提出了将绝缘电阻、参考电压、泄漏电流作为车载避雷器绝缘寿命预测的有效表征参量, 实现了基于状态检测数据的车载避雷器可靠性评估。

④ 建立基于主成分分析法的车载避雷器剩余寿命预测模型, 获得各老化特征参量关于剩余寿命模型的主成分贡献率, 构建最大主成分的寿命预测曲线, 结果表明CRH5系列标准动车组避雷器可运行750万km。

参考文献:

[1] 林长凌. CRH5型动车组避雷器检修试验分析与判断[J]. 铁道技术监督, 2015, 43(1): 29-31.
LIN Changling. Analysis and judgment of the inspection and repair test for lightning protector in CRH5 EMU[J]. Railway quality control, 2015, 43(1): 29-31.

[2] 陶桂东, 张安, 孙传铭, 等. 基于多物理场的车载电缆终端应力及形变仿真分析[J]. 高压电器, 2023, 59(5): 122-129.
TAO Guidong, ZHANG An, SUN Chuanming, et al. Simulation analysis of stress and deformation of vehicle cable terminal based on multi-physical field[J]. High voltage apparatus, 2023, 59(5): 122-129.

[3] 杨培功. ZnO避雷器发生故障的判断方法[J]. 山西电力, 2006(1): 61-62.
YANG Peigong. Judgement of ZnO lightning arrester the breakdown[J]. Shanxi electric power, 2006(1): 61-62.

[4] 郑增辉. 不同添加剂ZnO压敏电阻交流老化特性[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
ZHENG Zenghui. Influence of different additives on the AC degradation characteristics of ZnO varistor[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.

[5] 孙瑞, 章宝歌, 张振, 等. 新型多端口高压直流断路器拓扑对避雷器的影响[J]. 电瓷避雷器, 2023(4): 27-37.
SUN Rui, ZHANG Baoge, ZHANG Zhen, et al. Influence of new multi-port HVDC circuit breaker on lightning arrester[J]. Insulators and surge arresters, 2023(4): 27-37.

[6] 葛猛, 韩学坤, 陶安培. 金属氧化物避雷器阀片老化缺陷的诊断及原因分析[J]. 高压电器, 2009, 45(3): 145-147.
GE Meng, HAN Xuekun, TAO Anpei. Diagnosis and analysing the aged flaw of MOA valve piece[J]. High voltage apparatus, 2009, 45(3): 145-147.

[7] 王辉, 何锦强, 赵倡皓, 等. 35 kV金属氧化物避雷器雷电冲击老化性能的研究[J]. 电瓷避雷器, 2014(4): 72-77.
WANG Hui, HE Jinqiang, ZHAO Changhao, et al. Research of degradation performance of 35 kV MOA under lightning impulses[J]. Insulators and surge arresters, 2014(4): 72-77.

[8] 王佰川, 王聪. 基于改进YOLOv4的配电线路绝缘子与避雷器快速检测研究[J]. 电瓷避雷器, 2023(3): 166-174.
WANG Baichuan, WANG Cong. Rapid detection of insulators and arrester on distribution lines based on improved YOLOv4[J]. Insulators and surge arresters, 2023(3): 166-174.

[9] 赵海波, 张万起, 沈迪, 等. 动车组避雷器谐波特性分析及建模[J]. 高电压技术, 2022, 48(10): 3891-3899.
ZHAO Haibo, ZHANG Wanqi, SHEN Di, et al. Harmonic characteristics analysis and modeling of EMU arrester[J]. High voltage engineering, 2022, 48(10): 3891-3899.

[10] 陈子宣, 李春茂, 黄科宇, 等. 动车组避雷器可靠性与老化特征参量的相关性[J]. 电瓷避雷器, 2018(2): 111-115.
CHEN Zixuan, LI Chunmao, HUANG Keyu, et al. Relationship between reliability and aging characteristic parameters for surge arrester of EMU[J]. Insulators and surge arresters, 2018(2): 111-115.

[11] 刘健, 林大杰, 郭英强, 等. 动车组避雷器受潮故障特征量的变化特性研究[J]. 机车电传动, 2023(1): 131-137.
LIU Jian, LIN Dajie, GUO Yingqiang, et al. Study on variations in moisture-affected fault characteristics of EMU light-

- ning arrester[J]. Electric drive for locomotives, 2023(1): 131-137.
- [12] 张荣伟, 唐晓杰, 李龙, 等. 融合主成分含噪密度聚类与综合关联分析的混合非侵入式负荷辨识方法[J/OL]. 现代电力: 1-10 (2023-09-05) [2024-04-11]. <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2023.0152>.
- ZHANG Rongwei, TANG Xiaojie, LI Long, et al. Hybrid noninvasive load identification with combining PCA-DBSCAN clustering and comprehensive correlation analysis[J/OL]. Modern electric power: 1-10 (2023-09-05) [2024-04-11]. <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2023.0152>.
- [13] 余婧, 蒋安林, 刘亮, 等. 基于PCA降维的气动外形参数化方法[J]. 航空学报, 2024, 45(10): 62-81.
- YU Jing, JIANG Anlin, LIU Liang, et al. PCA aerodynamic geometry parametrization method[J]. Acta aeronautica et astronautica sinica, 2024, 45(10): 62-81.
- [14] 郭文强, 李建望, 黄梓轩, 等. 基于互信息-主成分分析-贝叶斯网络的化工过程故障诊断方法[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(21): 9144-9150.
- GUO Wenqiang, LI Jianwang, HUANG Zixuan, et al. MPBN-based fault diagnosis method for chemical processes [J]. Science technology and engineering, 2023, 23(21): 9144-9150.
- [15] 徐崇钧, 于鹤洋, 朱琪, 等. 基于多元特征分析的居民非侵入式相似电器辨识算法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(13): 111-121.
- XU Chongjun, YU Heyang, ZHU Qi, et al. Non-intrusive identification algorithm of residents' similar electrical appliances based on multivariate feature analysis[J]. Power system protection and control, 2023, 51(13): 111-121.

Study of aging life for EMU arresters based on aging tests and principal component analysis method

LI Ying¹, SONG Yanjun¹, XU Yuqi², LIU Kai², CHEN Kui², GAO Guoqiang²

(1. CRRC Tangshan Co., Ltd., Tangshan, Hebei 064035, China; 2. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 611756, China)

Abstract: On-board lightning arresters are critical components for ensuring the safety of EMUs operating on high-speed railways. This paper focuses on arresters mounted on EMUs as the research object. Through performance and aging tests (thermal-electrical aging, impulse aging, and high-order harmonic aging) conducted on arresters in operation over different distances and durations, this study examined their aging characteristics and the change patterns in performance parameters, and evaluated the reliability and service life of these on-board arresters. Additionally, an aging life model was established using the principal component analysis method for these arresters. The results show that the calculated evaluation value of the failure thresholds for the five performance parameters of the arresters reach 82 after standardized processing, indicating a service capacity of up to 7.5 million kilometers for new on-board arresters. The study can provide technical support for optimizing operation maintenance and overhaul limits in the subsequent applications of arresters, thereby improving levels of reliability.

Keywords: high-speed EMU; arrester; aging test; principal component analysis; life prediction