

动车组避雷器在线故障预警方法研究

朱文龙, 李 强, 徐海龙

(株洲中车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 动车组避雷器能够有效预防车内高压设备免受雷电大电流冲击, 从而保护动车组安全稳定运行, 然而避雷器的故障排查方法多依赖于传统的人工检修, 不仅人工成本高, 而且检修不及时, 极易导致避雷器“带病”运行, 造成动车组高压设备稳定运行存在安全隐患。针对避雷器内部受潮、阀片老化、表面污秽积累 3 种故障类型, 文中使用阈值比较法判定避雷器的运行状态, 同时针对阈值比较法在判定内部受潮和阀片老化两种主要的故障类型时, 易受到网压不稳定和环境温度湿度影响从而导致误报率增加的情况, 文中提出了加权阈值比较法和趋势分析法用于实现避雷器的在线故障预警, 并通过故障模式试验验证了所提算法的有效性, 试验结果符合相应的实际需求。

关键词: 避雷器; 故障模式试验; 加权; 阈值比较法; 趋势分析法; 故障预警

Research on Online Fault Warning Method for EMU MOA

ZHU Wenlong, LI Qiang, XU Hailong

(Zhuzhou CRRC Times Electric Co., Ltd., Hunan Zhuzhou 412001, China)

Abstract: The MOA of the high-speed train can effectively prevent the high-voltage equipment inside the train from being impacted by lightning currents, thereby protecting the safe and stable operation of the high-speed train. However, the fault diagnosis method of the MOA mostly relies on traditional manual maintenance, which not only has high labor costs, but also is not timely maintained, which can easily lead to the ‘faulty’ operation of the MOA and pose safety hazards to the stable operation of the high-voltage equipment of the high-speed train. This paper uses the threshold comparison method to determine the operating status of MOA for four types of faults: disconnection of grounding wire, internal moisture, aging of valve plates, and accumulation of surface pollution. At the same time, considering that the threshold comparison method is easily affected by unstable network voltage and environmental temperature and humidity when determining the two main types of faults: internal moisture and aging of valve plates, leading to an increase in false alarm rate, this paper proposes the weighted threshold comparison method and trend analysis method to achieve online fault warning of MOA. The effectiveness of the proposed algorithm is verified through fault mode experiments, and the experimental results meet the corresponding practical needs.

Key words: MOA; fault mode test; weighting; threshold comparison method; trend analysis method; fault warning

0 引言

动车组车顶的高压设备有效运行依赖于避雷器对牵引网过电压的有效限制。然而, 车载避雷器长期受到以下不良工况的影响, 如: ①接触网过分相和升降弓造成的过电压; ②列车电力电子设备产生的高次谐波; ③温度变化与潮湿侵入; ④污秽累积等。同时, 动车组行驶的环境包括寒风凛冽的东北地区、酷热难耐的南方火炉、梅雨连绵的江南、常年暴晒的西藏地区, 环境条件复杂多变, 这些不良工况和环境因素可能破坏避雷器的非线性工作特性, 如果未能及时检测到避雷器的异常情况并进行停电检修, 将可能长期处于故障状态, 导致阀片的热量超过本身的散热能力, 最终可能造成避雷器烧蚀或炸裂, 从而严重影响列车的安全与稳定运行^[1-7]。

针对避雷器监测的相关研究较多, 例如, 文[8-11]通过测量避雷器泄漏电流能够有效的判断避雷器是否出现故障, 但是要排查具体的故障类型需要停电拆卸检测, 未实现在线监测功能; 文[9, 12-13]通过红外检测、带电监测、现场解体试验分析了避雷器的失效原因, 然而红外检测方法成本较高, 且受环境温度影响较大,

易导致避雷器测量温度不准；文[14-18]针对避雷器设计了有效的在线监测系统，但多针对于电网系统中使用的三相避雷器，与轨道交通领域使用的单相避雷器有所区别。目前，电网系统中的避雷器已实现智能化带电检测，相关产品早已运用于电网系统。在动车组避雷器在线监测系统研究上，华北电力大学、北京交通大学、西南交通大学等单位涉及较多^[2, 19-20]，但相关监测系统尚未得到广泛应用，很少有专门针对动车组避雷器进行在线监测的成熟产品。当前动车组避雷器检修方式仍需依赖人工拆卸检测，这不仅浪费人力和时间，也不符合智能化动车组的需求。因此，亟待研发一种适用于动车组避雷器的在线监测系统取代人工检修。文中针对动车组避雷器，采用泄漏电流信号和网压信号作为原始信号，根据避雷器的等效电路计算监测参数，使用阈值比较法对避雷器故障状态做出了有效预警，同时针对内部受潮和阀片老化两种主要的故障类型，提出了一种新的在线预警方法，通过加权阈值比较法和趋势分析法来实现避雷器的在线故障预警，最后通过故障模式试验验证了文中所提方法的有效性。

1 避雷器故障机理分析及监测系统

1.1 故障机理分析

通常将氧化锌避雷器(metal oxide arrester, MOA)等效为一个非线性电阻 R 和电容 C 的并联电路，其等效电路见图 1(a)。在工频电压下，MOA 呈现高阻态，泄漏电流较小；在雷电过电压的作用下，MOA 呈现低阻态，泄漏电流迅速增大。随着外加电压的改变，MOA 的性质会迅速发生变化。根据图 1(b)所示的等效电路模型，可以将泄漏电流进行折算，得到阻性电流 I_r 、容性电流 I_c 、阻容比 I_r/I_c 等参数，计算公式见式(1)-(3)。当避雷器出现内部受潮、阀片老化、表面污秽积累会导致全电流、阻性电流、容性电流、阻容比中的部分指标或全部指标增加，降低避雷器的使用性能。避雷器故障模式及原因见图 2，其中内部受潮和阀片老化是避雷器最主要的故障类型。

$$I_r = I_x \times \cos \theta \quad (1)$$

$$I_c = I_x \times \sin \theta \quad (2)$$

$$\text{阻容比} = I_r / I_c \quad (3)$$

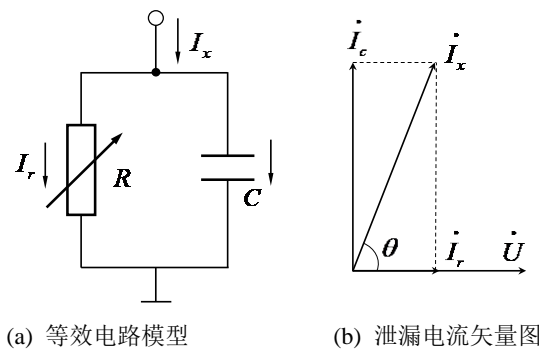


图 1 MOA 等效电路图和矢量图

Fig. 1 MOA equivalent circuit diagram and vector diagram

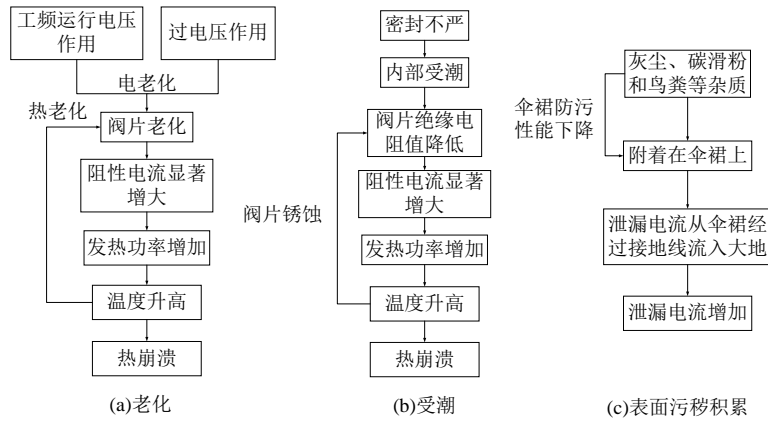


图 2 MOA 故障模式及原因

Fig. 2 MOA failure modes and causes

1.2 避雷器监测装置

根据避雷器的故障机理分析，文中设计的避雷器监测装置见图 3，该监测装置主要采集接触网二次侧电压和泄漏电流信号，然后计算全电流、阻性电流、容性电流、阻容比来监测避雷器的健康状况。监测装置设置 1 个零磁通微电流传感器，实现避雷器正常运行时泄漏电流信号的获取。避雷器接地线采用一匝穿芯模式穿过电流传感器，然后返回接地点。同时，监测装置使用电压互感器，将高压 PT 二次信号转换为可供测量的小信号。高压 PT 需提供 1 路二次信号给监测装置。在获得泄漏电流和网压二次侧信号后，监测主板中的信号处理模块对原始信号进行计算输出监测参数，并根据预警算法判定避雷器的健康状况，最后将避雷器的监测参数和预警信息反馈到在线监测人机界面上，用户可根据颜色来区分故障避雷器的预警等级和健康避雷器。

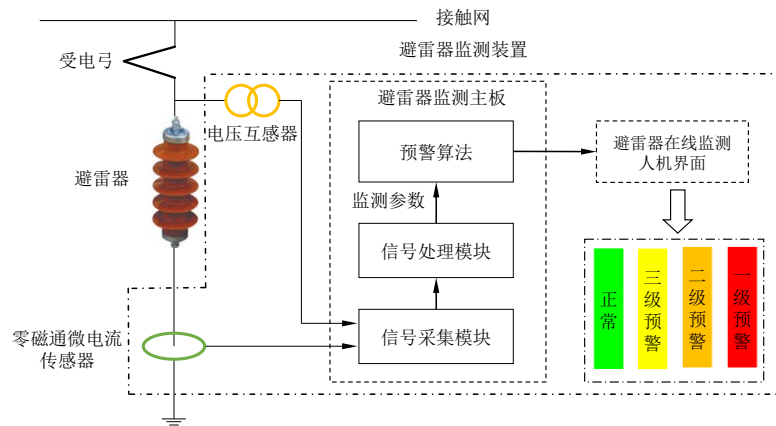


图 3 MOA 监测系统

Fig. 3 MOA monitoring system

2 避雷器在线预警算法

2.1 算法整体流程

目前，国内外对避雷器的在线监测方法主要分为：全电流法、谐波分析法、补偿法以及温度检测方法。根据避雷器的机理分析，文中基于全电流法，对避雷器表面污秽积累、阀片老化、内部受潮 3 种故障类型，使用阈值比较法判定避雷器运行状态，同时针对内部受潮和阀片老化两种避雷器主要故障类型，提出了加权阈值分

析法和趋势分析法的在线预警方法，预警算法整体流程见图 4。综合分析避雷器运行特征参量值，在采集到二次侧网压和泄漏电流数据后，将其乘以一定的变比然后经 FFT 算法计算出电压、电流的基波频率、幅值、相位，通过电压和电流的基波相位差折算出阻性电流、容性电流、阻容比的大小，然后根据阈值分析法和趋势分析法进行在线预警，得到避雷器的运行状态结果。

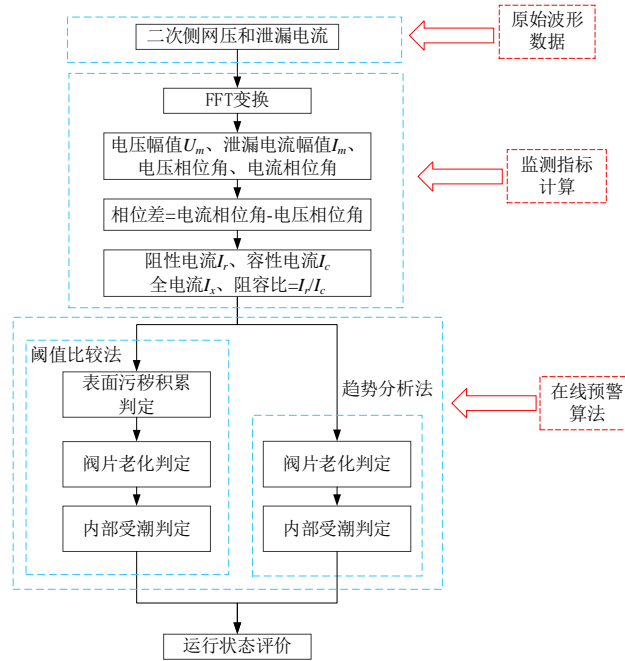


图 4 避雷器预警算法整体流程图

Fig. 4 Overall flowchart of MOA warning algorithm

2.2 在线预警算法

阈值比较法指的是针对每个待判定的数据量设定 3 个预警值，当监测值越限时发出预警信息。文中将避雷器运行状态评价分正常(显示绿色)、注意(III类预警——显示黄色)、异常(II类预警——显示橙色)、严重(I类预警——显示红色)4 个等级输出。其中故障类型分别为：①内部受潮；②阀片老化；③表面污秽积累。正常的避雷器在标准网压 27.5 kV 条件下，全电流、阻性电流、容性电流、阻容比的正常值为 $I'_x, I'_r, I'_c, (I_r / I_c)'$ ，根据相关的国家标准和现场检修经验，对内部受潮项点，III类预警的 I_x, I_r, I_c 分别设置为正常值的 1.1 倍、1.5 倍、1.1 倍，II类预警的 I_x, I_r, I_c 分别设置为正常值的 1.2 倍、2 倍、1.2 倍、I类预警的 I_x, I_r, I_c 分别设置为正常值的 1.3 倍、3 倍、1.3 倍；对老化项点，III类预警的 I_x, I_r, I_c 分别设置为正常值的 1.4 倍、4 倍、1.1 倍，II类预警的 I_x, I_r, I_c 分别设置为正常值的 1.5 倍、5 倍、1.2 倍、I类预警的 I_x, I_r, I_c 分别设置为正常值的 1.6 倍、6 倍、1.3 倍；对表面污秽积累项点，III类预警、II类预警、I类预警根据阻性电流和阻容比的变化趋势进行判断。相关阈值设置见表 1。

表 1 阈值比较法阈值设置

Table 1 Threshold comparison method threshold setting

故障类型	监测量	注意值(III 类预警)	警示值(II 类预警)	告警值(I 类预警)
------	-----	--------------	-------------	------------

内部受潮	I_x	$>1.1 \times I'_x$	$>1.2 \times I'_x$	$>1.3 \times I'_x$
	I_r	$>1.5 \times I'_r$	$>2.0 \times I'_r$	$>2.5 \times I'_r$
	I_c	$>1.1 \times I'_c$	$>1.2 \times I'_c$	$>1.3 \times I'_c$
	I_r/I_c	$>1.364 \times (I'_r/I'_c)$	$>1.667 \times (I'_r/I'_c)$	$>1.923 \times (I'_r/I'_c)$
阀片老化	I_x	$>1.4 \times I'_x$	$>1.5 \times I'_x$	$>1.5 \times I'_x$
	I_r	$>4.0 \times I'_r$	$>5.0 \times I'_r$	$>6.0 \times I'_r$
	I_c	$>1.1 \times I'_c$	$>1.2 \times I'_c$	$>1.3 \times I'_c$
	I_r/I_c	$>3.363 \times (I'_r/I'_c)$	$>4.167 \times (I'_r/I'_c)$	$>4.615 \times (I'_r/I'_c)$
表面污秽 积累	I_x	$I'_x - 0.05 < I_x < I'_x + 0.10$	$I'_x - 0.05 < I_x < I'_x + 0.10$	$I'_x - 0.05 < I_x < I'_x + 0.10$
	I_r	$I_r > I'_r + 0.05$	$I_r > I'_r + 0.10$	$I_r > I'_r + 0.15$
	I_c	$I'_c - 0.10 < I_c < I'_c + 0.05$	$I'_c - 0.10 < I_c < I'_c + 0.05$	$I'_c - 0.10 < I_c < I'_c + 0.05$
	I_r/I_c	$I_r/I_c > (I'_r/I'_c) + 0.05$	$I_r/I_c > (I'_r/I'_c) + 0.10$	$I_r/I_c > (I'_r/I'_c) + 0.15$

正常避雷器在投入使用后需要运行一定时间后才会出现相应的故障,因此需要研究一种方法评估避雷器长时间运行的健康状态,趋势分析法可对车载高压避雷器的运行状态发展趋势做出判断,趋势分析法指的是对同一设备不同时间段的监测数据进行纵向比较,判断监测数据的发展趋势是否大于设置的相应阈值。

其中纵向数据比较法数据处理流程如下:

1)提取当天 24 h 内的所有监测值,计算当天所有测量值的平均值 \bar{I}_x 、 \bar{I}_r 、 \bar{I}_c 、 (\bar{I}_r/\bar{I}_c) ;

2)计算 15 天前一周内当天的若干 \bar{I}'_x 、 \bar{I}'_r 、 \bar{I}'_c 、 (\bar{I}'_r/\bar{I}'_c) 值;

3)求取差值 $\Delta I_x = \bar{I}_x - \bar{I}'_x$ 、 $\Delta I_r = \bar{I}_r - \bar{I}'_r$ 、 $\Delta I_c = \bar{I}_c - \bar{I}'_c$ 、 $\Delta(I_r/I_c) = (\bar{I}_r/\bar{I}_c) - (\bar{I}'_r/\bar{I}'_c)$;

4)统计该时间段内 ΔI_x 、 ΔI_r 、 ΔI_c 、 $\Delta(I_r/I_c)$ 的相应阈值的概率,当概率大于 80% 时,立即发出趋势分析预警信息。

同样的,采用三级预警的方式进行状态评价,III 类预警、II 类预警、I 类预警的 ΔI_x 、 ΔI_r 、 ΔI_c 、 $\Delta(I_r/I_c)$ 按照阈值比较法中设置的预警阈值与避雷器标准网压 27.5 kV 条件下的 I_x 、 I_r 、 I_c 的差值进行设置。具体的阈值设置见表 2。

表 2 趋势分析法阈值设置

Table 2 Threshold setting for trend analysis method

故障类型	数据量	正常	注意	异常	严重
内部受潮	ΔI_x	$< 1.1 \times I'_x$	$> 0.1 \times I'_x$	$> 0.2 \times I'_x$	$> 0.3 \times I'_x$
	ΔI_r	$< 1.5 \times I'_r$	$> 0.5 \times I'_r$	$> 1.0 \times I'_r$	$> 1.5 \times I'_r$
	ΔI_c	$< 1.1 \times I'_c$	$> 0.1 \times I'_c$	$> 0.2 \times I'_c$	$> 0.3 \times I'_c$
	$\Delta(I_r / I_c)$	$< 1.364 \times (I'_r / I'_c)$	$> 0.364 \times (I'_r / I'_c)$	$> 0.667 \times (I'_r / I'_c)$	$> 0.923 \times (I'_r / I'_c)$
阀片老化	ΔI_x	$< 0.4 \times I'_x$	$> 0.4 \times I'_x$	$> 0.5 \times I'_x$	$> 0.5 \times I'_x$
	ΔI_r	$< 3.0 \times I'_r$	$> 3.0 \times I'_r$	$> 4.0 \times I'_r$	$> 5.0 \times I'_r$
	ΔI_c	$< 0.1 \times I'_c$	$> 0.1 \times I'_c$	$> 0.2 \times I'_c$	$> 0.3 \times I'_c$
	$\Delta(I_r / I_c)$	$< 2.363 \times (I'_r / I'_c)$	$> 2.363 \times (I'_r / I'_c)$	$> 3.167 \times (I'_r / I'_c)$	$> 3.615 \times (I'_r / I'_c)$

由于避雷器长期带电运行，容易受到不稳定网压、环境温度的影响，因此易导致某时刻监测量出现超阈值的情况，文中提出的加权阈值比较法和趋势分析法用于内部受潮、阀片老化故障预警可有效降低该情况导致的误报率，算法将阈值比较法权重设置为 30%，趋势分析法的权重设置为 70%，在满足相应的阈值设定后，将阈值比较法的分数设置为 30，趋势分析法的分数设置为 70，反之则均设为 0，只有分数大于等于 70 时，避雷器才会发出预警，具体的判定规则见表 3。

表 3 加权阈值比较法和趋势分析法判定规则

Table 3 Weighted threshold comparison method and trend analysis method determine the rules

阈值比较法分数	趋势分析法分数	加权得分	是否发出预警
0	0	0	×
0	30	30	×
0	70	70	✓
30	70	100	✓

3 试验验证

为验证所提出的避雷器在线监测算法，文中通过污秽试验、老化试验、受潮试验 3 种故障模式试验，研究受潮—特征量、老化—特征量、污秽—特征量的变化规律，同时统计老化试验、受潮试验的 ΔI_x 、 ΔI_r 、 ΔI_c 、 $\Delta(I_r / I_c)$ 根据所提出的算法获得避雷器试验样品的故障预警信息。

3.1 污秽试验

本试验选取车辆段 4 只伞裙污秽积累的避雷器作为样品，其中避雷器样品 1 污秽面积占伞裙面积 75%左右，污秽程度属于中等，样品 2、样品 3、样品 4 污秽面积占伞裙面积的 50%左右，污秽程度属于轻微。先对污秽避雷器进行测试，然后将避雷器整体进行清洗后再进行测量，测试结果见表 4。试验结果发现清洗前后避雷器阻性电流和阻容比会有一些的变化，全电流和容性电流变化结果不明显。因此，避雷器伞裙污秽积累主要针对阻性电流和阻容比的变化趋势进行判断。根据避雷器监测装置和文中所提出的避雷器预警算法判定 4 只污秽避雷器的预警情况，预警结果见表 5，其中样品 1 的预警结果为 II 类预警，样品 2、样品 3、样品 4 的预警结果为 III 类预警。根据避雷器伞裙污秽积累程度，预警结果符合相应的实际情况。

表 4 27.5 kV 条件下避雷器污秽试验全电流、阻性电流、容性电流、阻容比测试结果

Table 4 Results of I_x , I_r , I_c , and I_r/I_c tests on MOA pollution under 27.5 kV conditions

避雷器编号	污秽等级	测量状态	全电流/mA	阻性电流/mA	容性电流/mA	阻容比
样品 1	中等	清洗前	0.704	0.148	0.686	0.213
		清洗后	0.697	0.138	0.687	0.202
样品 2	轻微	清洗前	0.681	0.110	0.671	0.159
		清洗后	0.684	0.107	0.677	0.158
样品 3	轻微	清洗前	0.712	0.110	0.704	0.156
		清洗后	0.708	0.106	0.700	0.152
样品 4	轻微	清洗前	0.698	0.110	0.688	0.160
		清洗后	0.694	0.105	0.685	0.153

表 5 污秽避雷器预警结果

Table 5 Pollution MOA warning result

避雷器编号	阈值比较法判定结果	预警结果	是否预警正确	预警颜色
样品 1	II 级预警	II 级预警	✓	■
样品 2	III 级预警	III 级预警	✓	■
样品 3	III 级预警	III 级预警	✓	■
样品 4	III 级预警	III 级预警	✓	■

3.2 老化试验

老化试验选取车辆段检修不合格的避雷器进行试验，共选取车辆段老化避雷器 2 只，然后进行直流测试和加压试验。对某老化避雷器，假设该避雷器出厂直流 1 mA 测试的参考电压为 U_{1mA} ，退回后测量得到的直流 1 mA 测试的参考电压为 U_{1mA}' ，则老化程度的计算公式为

$$\text{老化程度} = 1 - \frac{U_{1mA}'}{U_{1mA}} \quad (4)$$

直流测试的结果见表 6，对比正常避雷器直流测试数据 $U_{1mA} = 61.7$ 、 $I_{0.75U_{1mA}} = 9\mu A$ ，老化避雷器的 U_{1mA} 较大幅度降低， $I_{0.75U_{1mA}}$ 很大程度上升高，说明避雷器电阻片老化程度高会导致泄漏电流大幅增加，造成避雷器性能下降，影响避雷器的正常使用。两只老化的避雷器测试结果见图 5，从图 5 可见全电流、阻性电流、容性电流均有所上升，但阻性电流增加较为明显，在加压 27.5 kV 时，正常避雷器阻性电流不会超过 0.1 mA，老化程度 29.68% 避雷器的阻性电流为 0.722 mA，老化程度 42.72% 避雷器的阻性电流为 1.200 mA。

表 6 老化避雷器直流测试结果
Table 6 DC test results of aging MOA

编号	直流测试		
	U_{1mA}	$I_{0.75U_{1mA}}$	工频参考电压
1	35.4	442	23.4
2	43.6	582	32.4

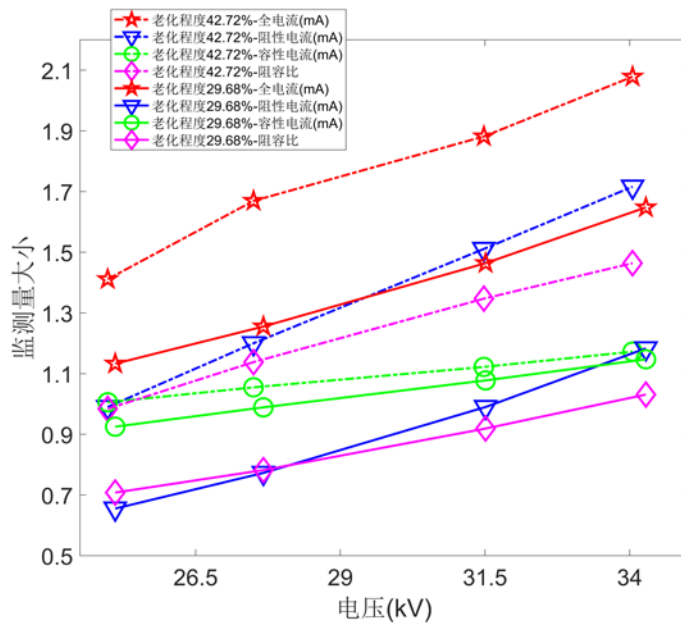


图 5 老化试验测量结果

Fig. 5 Aging experiment measurement results

统计老化避雷器样品 15 天前一周内的 ΔI_x 、 ΔI_r 、 ΔI_c 、 $\Delta(I_r/I_c)$ ，结果见图 6，根据避雷器监测装置和文中提出的避雷器加权阈值比较法和趋势分析法在线预警算法，预警结果见表 7，1 号避雷器的预警结果为 I 类预警，2 号避雷器的预警结果为 I 类预警，根据避雷器出厂要求，两只避雷器均不能正常运营使用，属于严重故障，算法预警结果与实际结果保持一致。

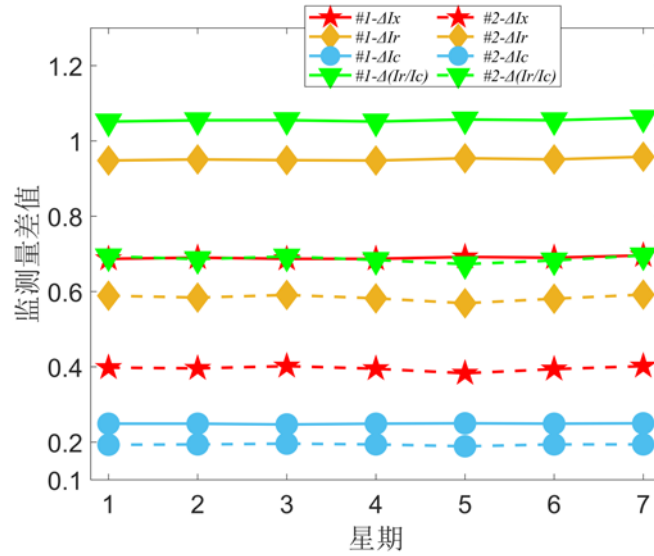


图 6 老化避雷器一周内监测量差值

Fig. 6 Measurement difference of aging MOA within one week

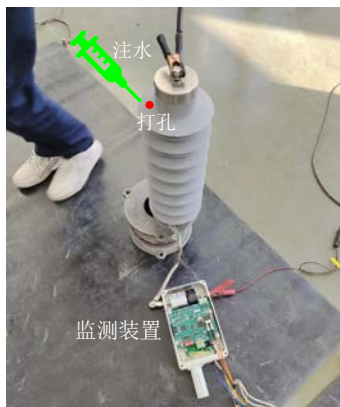
表 7 老化避雷器加权阈值比较法和趋势分析法预警结果

Table 7 Warning results of weighted threshold comparison method and trend analysis method for aging MOA

编号	阈值比较法预警等级	阈值比较法分数	趋势分析法预警等级	趋势分析法分数	加权得分	预警结果	是否预警正确	预警颜色
1	I类预警	30	I类预警	70	100	I类预警	✓	■
2	I类预警	30	I类预警	70	100	I类预警	✓	■

3.3 受潮试验

为验证文中提出的避雷器内部受潮在线预警算法，试验人员在避雷器伞裙上打孔，使用真空水箱向避雷器内部注水，具体操作见图 7。试验中，当进水孔一共冒出 5 个水泡后，立即断电，取出避雷器擦干表面的水。紧接着，用胶带封住伞裙的孔，放置一天，让内部水分充分挥发，然后进行测量。连续测量一周，计算各监测量差值，测试结果见图 8。




(a) 伞裙打孔



(b) 真空水箱注水

图 7 避雷器受潮试验

Fig. 7 Dampness test of MOA

III 类预警	30	III 类预警	70	100	III 类预警	✓	
---------	----	---------	----	-----	---------	---	---

4 结语

针对避雷器内部受潮、阀片老化、表面污秽积累 3 个故障类型使用阈值比较法判定避雷器的状态,同时针对阀片老化和内部受潮的在线预警,提出了加权阈值比较法和趋势分析法;在监测量计算上,基于泄漏电流和二次侧网压两项原始数据,计算全电流 I_x 、阻性电流 I_r 、容性电流 I_c 、阻容比 I_r/I_c 作为阈值比较法的指标量,并统计 15 天前一周内监测量差值 ΔI_x 、 ΔI_r 、 ΔI_c 、 $\Delta(I_r/I_c)$ 作为趋势分析法的指标量。最后通过受潮、老化、污秽 3 种故障模式试验验证了本文所提出的方法,算法预警结果和避雷器实际情况均保持一致,能够有效满足动车组避雷器的在线预警需求。

参考文献:

- [1] 张启哲. 动车组车顶避雷器故障及状态评价方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2022.
ZHANG Qizhe. Research on fault and condition evaluation methods of EMU roof arrester[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2022.
- [2] 丁 璠. 频繁过电压下动车组车顶避雷器老化特性与监测技术[D]. 北京: 北京交通大学, 2022.
DING Fan. Aging characteristics and monitoring technology of roof arrester of EMU under frequent overvoltage[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022.
- [3] 吴朦朦. 氧化锌避雷器在线监测及专家诊断系统[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014.
WU Mengmeng. MOA on-line monitoring and expert diagnosis system[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014.
- [4] 张 运. 氧化锌避雷器在线监测技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
ZHANG Yun. Investigation on online monitoring technology for zinc oxide arresters[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [5] SILAKHORI K, MIRZAI E, AHMADI I. Electro-thermal analysis and dynamic arc parameters evaluation in multi chamber arrester under structural and dimensional changes effect using the finite element method[J]. Electric Power Systems Research, 2024(229): 110185.
- [6] LI P, ZHANG J, TAO Q, et al. Fault diagnosis method for arrester in infrared images based on improved U-Net[J]. Measurement, 2024(236): 114996.
- [7] MA H, SUN F, FAN B, et al. Research on online monitoring method of arrester deterioration based on improved genetic algorithm[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2023, 2422(1): 012008.
- [8] 姜楠楠, 王文浩, 蔺家骏, 等. 基于泄漏电流三相不平衡度的避雷器在线监测优化方案[J]. 浙江电力, 2024, 43(5): 116-124.
JIANG Nannan, WANG Wenhao, LIN Jiajun, et al. An optimal online monitoring scheme for lightning arresters based on the three-phase imbalance of leakage current[J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(5): 116-124.
- [9] 毛火平. 基于泄漏电流和红外热像的金属氧化物避雷器联合检测技术研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2018.
MAO Huoping. Research on joint detection technology of metal oxide surge arrester based on leakage current and infrared thermal image[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018.
- [10] 郑云海, 吴奇宝, 高阿娜, 等. 110 kV 氧化锌避雷器直流试验数据异常分析处理[J]. 电工技术, 2019(13): 97-98.
ZHENG Yunhai, WU Qibao, GAO Ana, et al. Analysis and processing of abnormal data in DC test of 110 kV Zinc oxide arrester[J]. Electric Engineering, 2019(13): 97-98.
- [11] 林楚标, 廖永力, 李锐海, 等. 110 kV 整只氧化锌避雷器雷电冲击老化特性研究[J]. 南方电网技术, 2015, 9(7): 40-45.
LIN Chubiao, LIAO Yongli, LI Ruihai, et al. Research on degradation performance of 110 kV full-scale ZnO MOA under lightning impulses[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(7): 40-45.
- [12] 靳海军, 靳文星. 红外测温诊断技术在避雷器内部过热故障诊断中的应用[J]. 能源与节能, 2019(10): 175-176.

-
- JIN Haijun, JIN Wenxing. Application of infrared temperature measurement diagnosis technology in overheat fault diagnosis of lightning arrester[J]. Energy and Conservation, 2019(10): 175-1761.
- [13]黄灵资, 刘 . 基于带电检测技术的一起 35 kV 金属氧化物避雷器缺陷分析[J]. 电气技术, 2019, 20(1): 112-115.
HUANG Lingzi, LIU Hao. The defects analysis of 35 kV arrester on the basic of live detection technology[J]. Electrical Engineering, 2019, 20(1): 112-115.
- [14]高旭光. 避雷器在线监测装置的设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
GAO Xuguang. Design and implementation of arrester on-line monitoring device[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018.
- [15]江 阳. 避雷器在线监测系统设计与应用[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2018.
JIANG Yang. Design and application of on-line arrester monitoring system[D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2018.
- [16]王金海. 金属氧化物避雷器在线监测原理及系统研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
WANG Jinhai. Research on metal oxide surge arrester on-line monitoring principle and system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [17]莫旭阳. 氧化锌避雷器状态在线监测系统设计与应用[D]. 南京信息工程大学, 2015.
MO Xuyang. Design of MOA online monitoring system[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2015.
- [18]陈 婷. 氧化锌避雷器阻性电流测量方法与应用技术研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2012.
CHEN Ting. Measurement of metal oxide arrester resistive current and implementation[D]. Suzhou: Soochow University, 2012.
- [19]毛帅涛. 动车组车顶避雷器阀片发热及其劣化特性试验研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2023.
MAO Shuaitao. Experimental study on the heating and deterioration characteristics of the lightning arrester valve plate on the roof of the multiple unit[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2023.
- [20]欧 琦. 动车组车顶避雷器内部缺陷模拟试验及仿真研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2023.
OU Qi. Simulation test and simulation research on internal defects of EMU arrester[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2023.

朱文龙(1987—), 男, 博士研究生, 高级工程师, 从事 PHM 相关工作(E-mail: zhuwl1@teg.cn)。