

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231186

## 基于健康指数的架空线路运行状态评价方法研究

高飞<sup>1</sup>, 刘颖异<sup>2</sup>, 贾鹏飞<sup>1</sup>, 杨洋<sup>1</sup>

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192; 2. 北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院, 北京 100191)

**摘要:** 针对现有架空线路运行状态评估存在的问题, 提出一种基于健康指数的架空线路运行状态综合评估方法。该方法结合架空线路运行特点, 综合考虑线路本体及天气、环境等外力因素影响, 系统地研究了影响线路健康状态的各级关键因素及其影响系数。考虑不同影响因素重要程度, 采取定性、定量相结合的方式, 提出了层次分析法、优劣解距离法、专家研讨法三者相结合的线路健康指数计算方法。利用该方法对南京某实际 110 kV 架空线路运行状态进行现场验证, 证明了所提方法的有效性。所提方法不仅适用于架空线路健康状态的评估, 也可为其他电力设备的健康状态评估提供参考。

**关键词:** 健康指数; 架空线路; 状态评价

### Evaluation technology for the operational status of overhead lines based on a health index

GAO Fei<sup>1</sup>, LIU Yingyi<sup>2</sup>, JIA Pengfei<sup>1</sup>, YANG Yang<sup>1</sup>

(1. China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100192, China; 2. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** There are problems in the evaluation of the operational status of overhead lines. Thus a comprehensive evaluation method based on a health index is proposed. The method combines the operational characteristics of overhead lines. It involves comprehensive consideration of the line itself and the external factors such as weather and environment. The method systematically considers the key factors and their influencing coefficients on the health status of the line. Taking into account the importance of different influencing factors and adopting a combination of qualitative and quantitative methods, a calculation method for the line health index based on a combination of the analytic hierarchy process, the distance between good and poor solutions, and an expert discussion method is proposed. Using this method, on-site verification is conducted on the actual operational status of a 110 kV overhead line in Nanjing. The results demonstrate the effectiveness of the proposed method. The method proposed in this paper is not only applicable to the assessment of the health status of overhead lines, but also provides a reference for the health status assessment of other power equipment.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 62073013).

**Key words:** health index; overhead lines; status evaluation

## 0 引言

架空线路涉及面广、接线方式复杂, 且长期暴露于外部环境。每年因线路故障导致的供电问题时有发生, 线路健康状况已成为影响配电网安全可靠运行的重要因素。为了预防线路故障导致的供电问题, 及时对线路的健康状态进行评价至关重要。

目前, 国内外已有很多学者围绕架空线路的运

行状态检测与评价开展了研究, 研制了电压、电流、风振等测量装置及系统, 解决了架空线路各种状态量的监测与通信问题<sup>[1-14]</sup>, 但未关注架空线路运行状态的具体评价方法。

文献[15]基于蒙特卡罗法对架空线路的防雷性能进行了评估, 并提出基于雷电过电压缓解程度间接反映架空线路运行状况的方法。文献[16]提出一种基于优劣解距离法的复合绝缘子综合健康评估模型。上述方法的理念都是通过分析某一部件(如避雷器、复合绝缘子等)的状态, 间接反映架空线路的健康状态, 无法实现线路健康状态的整体评价。

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(62073013): 特高压直流线路可听噪声真型试验检测新方法与应用研究

目前,国内关于配电网架空线路的整体评价主要依据《配网设备状态评价导则》《配网设备状态检修导则》等与架空线路运行密切相关的标准开展<sup>[17-18]</sup>。在《配网设备状态评价导则》中,架空线路的评价被分为8个组成部分——杆塔、导线、绝缘子、铁件金具、拉线、通道、接地装置、附件,共37项状态量。《配网设备状态检修导则》的检修项与《配网设备状态评价导则》对应,也包含37项状态量,评价过程主要采用扣分制。上述评价方法全面细致,有效指导了我国架空线路的运行状态评价,但存在如下问题:采用的关键特征量较多,且仅关注架空线路的本体部件,忽略了外部因素的影响,难以发现潜在缺陷并反映对象真实状态。

针对架空线路的整体评价,文献[19]采用可靠性框图方法,根据线路继电器历史故障数据,评估各种设备的可靠性和可用性。该方法需要线路上所有设备的可靠性模型,但实际场景中设备的可靠性分布很难获得。文献[20]基于贝叶斯神经网络模型,计算了架空线路故障分类的置信区间和概率,但忽略了不同架空线路的个体差异。文献[21]提出了一种基于风险的架空线路维护决策方法,该方法需要计算每个资产的故障概率,对国内量大面广的架空线路并不适用。文献[22]针对线路所有部件,提出了一种基于多信息融合的线路状态评估方法,并将其应用于设备运维管理中,但该方法只考虑线路本体因素,未考虑外力因素的影响。

近年来,健康指数的理念逐渐被引入电力领域。如文献[23]提出一种计及网络结构的配电网健康状态评估方法,用于判断配电网实时运行状况及健康状态。文献[24]从健康状态评价的数据分析、机组健康状态与控制的相互影响、整机的健康状态评价及预测等方面,研究了大型风力发电机组健康状态。总的来说,国内外关于电力领域健康指数的研究基本聚焦在高压设备方向<sup>[25]</sup>,尤其是变压器的剩余寿命评估。而对于架空线路,相关研究还不足。由于运行方式、环境条件、影响因素等不同,架空线路的健康状况评估与其他电力设备有着较大不同。因此,提出适用于架空线路的基于健康指数的运行状态评价方法,需要进一步研究。

综上所述,现有架空线路健康状态评估方法仍存在进一步深化研究的空间。一方面,部分方法仅关注单个部件的健康状态,不能很好地反映线路的整体健康状况;另一方面,现有架空线路整体健康状态评估涉及关键特征量较多,且只考虑线路本体因素,忽略了天气、环境等外力因素的影响。另外,部分基于可靠性、故障概率的评价方法,存在忽略

个体差异或工作量大等问题。因此,如何选取合适的参数表征架空线路的运行状况,并且根据线路运行状况和外部因素综合判断线路是否健康运转,仍是需要解决的问题。

针对上述问题,本文以架空线路为研究对象,将健康指数理念引入线路健康状况的综合评价中。首先,通过分析架空线路产生故障的原因,确定影响线路健康状况的内外部关键特征量。在此基础上,研究适应架空线路特点的健康指数计算方法,通过建立影响架空线路健康状况的3级关键因素,并根据运行导则、实测数据和专家意见等设定不同关键因素的权重系数,提出层次分析法、优劣解距离法、专家研讨法三者相结合的线路健康指数计算方法。最后,将所提计算方法在实际配电网线路中试点应用,验证了方法的有效性。

## 1 架空线路健康指数定义及关键特征量

### 1.1 架空线路健康指数的定义

架空线路是一个离散量和连续量相结合的复杂动态系统,它的运行状况与人体健康有许多相似之处。架空线路健康指数是衡量和表征线路健康状态的一个数值,它可以在获得线路关键特征量的基础上,通过复杂的逻辑和数学运算获得。健康指数具有逻辑性强、时间上连续的特点,可用于判定线路是否需要干预(维修),并可估算线路的剩余寿命等。本文定义线路健康指数的取值范围为(0,5],共分5个等级:(4,5]对应健康状态、(3,4]对应亚健康状态、(2,3]对应一般缺陷、(1,2]对应严重缺陷、(0,1]对应危急缺陷。如表1所示。

表1 架空线路健康指数等级划分

Table 1 Classification of health index levels for overhead lines

指数得分 $x$	对应状态	状态描述
$4 < x \leq 5$	健康	线路能在规定时间内、规定条件下继续无阻碍执行所规定的功能,各项性能均达标,对应的关键特征量裕度充足,抵抗风险及环境适应能力强。
$3 < x \leq 4$	亚健康	线路能在规定时间内、规定条件下正常执行所规定的功能,各项性能尚达标,但部分关键特征量已接近标准限值,抵抗风险及环境适应能力下降。
$2 < x \leq 3$	一般缺陷	线路能在规定时间内、规定条件下正常执行所规定的功能,但已出现部分性能退化,对应的关键特征量指标越限,但综合影响程度小,抵抗风险及环境适应能力存在轻度缺陷。
$1 < x \leq 2$	严重缺陷	线路仍能在规定时间内、规定条件下正常执行所规定的功能,但已出现部分性能严重退化,对应的关键特征量指标越限,综合影响程度大,抵抗风险及环境适应能力存在明显缺陷。
$0 < x \leq 1$	危急缺陷	线路已无法执行所规定的功能,但经过大修后仍可恢复功能。

## 1.2 架空线路的关键特征量

描述架空线路运行状态的特征量很多, 且不同特征量反映的影响线路健康状态的因素也各不相同。如何从众多特征量中选出反映线路健康状态的关键特征量, 是实现线路健康指数计算的关键问题。本文以 110 kV 架空线路为研究对象, 参考多个国家与线路运行状态评估密切相关的导则规程, 从历史故障原因统计分析、一线运维专家意见以及已有成果总结分析等多个角度出发, 分析了各种因素对线路健康状态的影响规律及重要程度, 并从中提炼出最能表征线路健康状态的关键特征量。所考虑因素既包括反映线路由于本身老化和质量问题的本体因

素, 也包括自然因素和人为因素等以往未被很好考虑的外力因素。

基于国家电网公司城市配电网多年月度分析报告, 本文对相关历史数据进行了统计分析。以 2011 年为例, 表 2 列举了我国城市配电网 110 kV 架空线路主要故障频次统计情况<sup>[26]</sup>。表中, 将因拉线、通道、接地装置、附件等故障造成的架空线路故障列为其他原因。可见, 相较于其他原因, 导线、杆塔、绝缘子是影响线路健康状况的主要组件。其中, 对于导线和杆塔, 设备本体和外力因素都是其发生故障的主要原因。对于绝缘子, 仅有设备本体因素是其发生故障的主要原因。

表 2 110 kV 架空线路主要故障频次统计表

Table 2 Statistical table of main fault frequency of 110 kV overhead lines

故障类型		月份											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
导线	外力因素	156	149	213	297	283	223	191	173	164	142	132	111
	设备本体	59	96	89	67	64	87	120	80	64	57	45	74
杆塔	外力因素	80	59	97	90	62	62	52	56	37	40	62	42
	设备本体	11	5	6	5	1	4	13	5	2	2	6	3
绝缘子	外力因素	33	28	31	40	24	40	30	36	25	23	25	19
	设备本体	2	2	1	10	4	4	1	5	2	0	1	1
其他原因		33	41	35	24	26	30	54	38	26	19	16	15

由表 2 可知, 自然因素、人为因素等外力因素是造成架空线路故障的重要原因。因此, 本文从外力因素的角度确立了影响线路健康指数的部分关键特征量。进一步, 以北京丰台电力公司 2016 年的架空线路故障数据<sup>[27]</sup>为例进行分析, 图 1 展示了其因不同外力因素造成的线路故障统计情况。

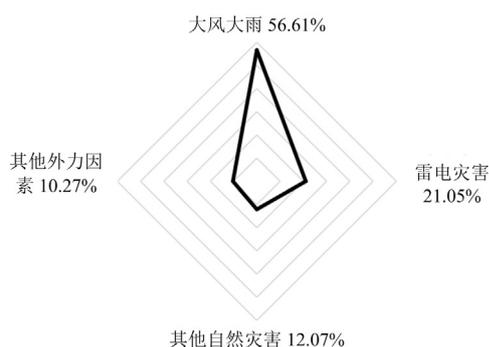


图 1 外力因素对架空线路故障影响的统计结果

Fig. 1 Statistical results of the effects of different natural factors on overhead line faults

由图 1 可知, 在各种自然因素中, 大风、强降雨以及雷电是造成架空线路故障的主要因素。特别是当线路附近遇有树障时, 其产生的负面影响更加

剧烈。因此, 上述因素在本文中被重点考虑。同时, 已有实践经验表明, 线路杆塔附近的施工情况、车辆撞杆情况等也是影响线路健康状态的重要人为外力因素, 因此也被本文作为外力因素予以考虑。同时由表 2 可知, 与导线和杆塔不同, 外力因素导致绝缘子发生故障的频次相对较少, 其明显低于设备本体因素的影响。因此对于绝缘子的关键特征量选取, 本文仅考虑了本体因素。根据上述分析, 选取影响线路健康状态的关键特征量如表 3 所示。

## 2 架空线路健康指数的计算方法

为了计算架空线路的健康指数, 本文提出将层次分析法、优劣解距离法、专家研讨确定关键特征量权重三者相结合的线路健康指数计算方法。

层次分析法将决策问题按总目标、各层子目标、评价准则、最终方案的顺序, 分解为不同层次结构。其优点是: 将研究对象作为系统, 通过定量和定性数据融合计算, 可以进行系统性分析; 缺点是: 各级权重设置对计算结果影响明显, 特别是对于定性特征量计算, 易受到人为因素的影响。

优劣解距离法基于归一化后的数据矩阵, 找出有限方案中的最优方案和最劣方案, 然后分别计算评价对象与最优方案和最劣方案的距离, 获得各评

表 3 110 kV 架空线路关键特征量

Table 3 Key characteristic quantities of 110 kV overhead lines

组成部件	因素类别	关键特征量
导线	本体因素	导线接头温度
		导线与交跨物距离
		导线弧垂
		导线等效服役年限
		导线断股
		导线散股
		导线金具外观
杆塔	外力因素	树障
		雷电
		大风
		强降雨
杆塔	本体因素	杆塔倾斜度
		杆塔埋深
		接地电阻
绝缘子	外力因素	杆塔附近施工情况
		本体因素

价对象与最优方案的相对接近程度。其优点是：通过对原始数据进行归一化处理，可以消除不同指标量纲的影响，并能充分利用原始数据的信息；缺点是：采用一维定性方式确定指标权重，在多因素分析情况下，指标权重确定难度较大。

本文将层次分析法、优劣解距离法以及通过专家研讨确定关键特征量权重的方法相结合，在保留各自方法优点的基础上，避免单一方法存在的缺点。首先，考虑关键特征量对线路健康状态的复杂影响，采用层次分析法将这种复杂影响关系逐层分解，并采用专家研讨方式确定每层权重系数，规避层次分析法存在的难以确定定性特征量权重的缺点。其次，采用优劣解距离法，对原始关键特征量数据进行归一化处理，减少因不同指标量纲差异带来的信息损失；同时，根据评价对象当前状态与最优、最劣方案距离，对评价对象进行相对优劣评价。

### 2.1 关键特征量的权重系数确定

关键特征量权重系数是影响线路健康指数评估结果的重要参数，本文采用专家研讨法获取关键特征量的权重系数。为提高评估结果的准确性，本文充分吸收一线专家意见，具体流程如图 2 所示。

首先，明确研讨会的目标和任务，并由主持人邀请设计、制造、测试、检验等不同领域的专家。接着，专家组审查研讨会信息，并讨论不同层级的权重系数。如表 3 所示，如果将架空线路作为第一层级，则导线、杆塔、绝缘子为第二层级，导线、杆塔、绝缘子下的各个关键特征量为第三层级。具

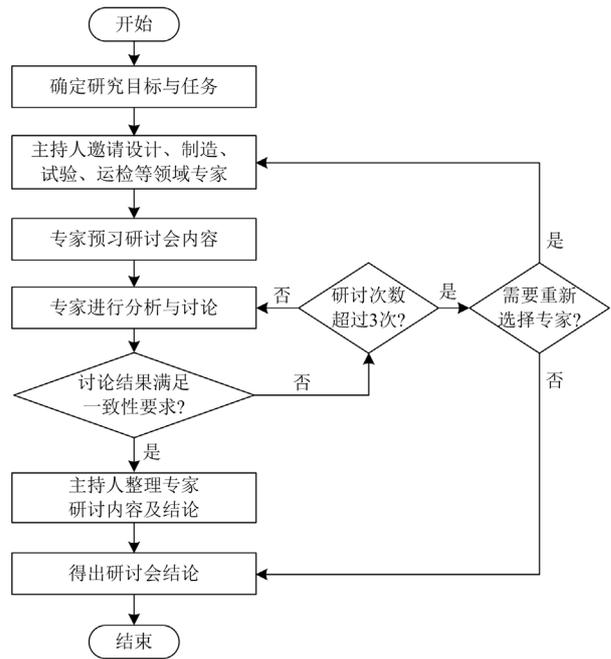


图 2 专家研讨法确定关键特征量权重系数流程

Fig. 2 Process for determining the weight coefficients of key feature quantities using expert discussion method

体评估时，每个专家首先对第二层级，即导线、杆塔、绝缘子的权重系数进行讨论，并给出权重向量  $\Omega_k$ 。

$$\Omega_k = \{\omega_{1,k}, \omega_{2,k}, \omega_{3,k}\} \quad (1)$$

式中， $\omega_{1,k}$ 、 $\omega_{2,k}$ 、 $\omega_{3,k}$  分别表示第  $k$  位专家给出的导线、杆塔、绝缘子的权重系数。

然后，对位于第三层级的各个关键特征量的权重系数进行讨论，并由每个专家分别设置各个关键特征量的权重，从而获得第三层级的权重系数向量。

$$W_{1,k} = \{\omega_{1,1,k}, \omega_{1,2,k}, \dots, \omega_{1,i,k}, \dots, \omega_{1,m_1,k}\} (i = 1, 2, \dots, m_1) \quad (2)$$

$$W_{2,k} = \{\omega_{2,1,k}, \omega_{2,2,k}, \dots, \omega_{2,i,k}, \dots, \omega_{2,m_2,k}\} (i = 1, 2, \dots, m_2) \quad (3)$$

$$W_{3,k} = \{\omega_{3,1,k}, \omega_{3,2,k}, \dots, \omega_{3,i,k}, \dots, \omega_{3,m_3,k}\} (i = 1, 2, \dots, m_3) \quad (4)$$

式中： $W_{1,k}$ 、 $W_{2,k}$  和  $W_{3,k}$  分别为属于导线、杆塔和绝缘子的各个关键特征量的权重系数向量； $\omega_{1,i,k}$ 、 $\omega_{2,i,k}$  和  $\omega_{3,i,k}$  分别为第  $k$  个专家给出的，属于导线、杆塔和绝缘子的第  $i$  个关键特征量的权重系数，其值介于 0 和 1 之间。

由于专家评估不同层级的权重系数主要基于其个人经验，因此有必要验证权重系数向量的一致性。本文中，权重评估结果之间的接近程度用不同向量之间的角度表示。其中，角度  $\theta_{PL,\Omega}$  表示 P 专家和 L

专家给出的两个第二层级权重系数向量之间的差异; 角度  $\theta_{PL,W_1}$ 、 $\theta_{PL,W_2}$  和  $\theta_{PL,W_3}$  表示 P 专家和 L 专家给出的属于导线、杆塔和绝缘子的两个第三层级权重系数向量之间的差异。以导线为例, 设置阈值  $\alpha$ , 验证专家意见是否符合一致性要求。当  $\theta_{PL,W_1} > \alpha$  时, 专家需重新讨论权重系数设置。如果由于专家意见不一致, 导致研讨超过三次, 则主持人需重新选择专家, 如果不重新选择专家, 视为放弃此次讨论话题。 $\theta_{PL,W_1}$  可由式(5)计算。

$$\theta_{PL,W_1} = \cos^{-1}[(\mathbf{W}_{1,P} \cdot \mathbf{W}_{1,L}) / (\|\mathbf{W}_{1,P}\| \times \|\mathbf{W}_{1,L}\|)] \quad (5)$$

式中:  $\mathbf{W}_{1,P}$  是 P 专家设置的导线权重系数向量;  $\mathbf{W}_{1,L}$  是 L 专家设置的导线权重系数向量。 $\theta_{PL,W_2}$  和  $\theta_{PL,W_3}$  的处理方式与  $\theta_{PL,W_1}$  相同。

如果所有结果都满足一致性要求, 主持人将通过式(6)和式(7)获得所有权重系数向量的最终结果, 这些结果综合反映了不同领域专家的意见。

$$\mathbf{W}_t = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \mathbf{W}_{t,1,k}, \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \mathbf{W}_{t,2,k}, \dots, \right. \quad (6)$$

$$\left. \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \mathbf{W}_{t,i,k}, \dots, \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \mathbf{W}_{t,m_i,k} \right\}, (t=1,2,3)$$

$$\boldsymbol{\Omega} = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \omega_{1,k}, \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \omega_{2,k}, \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \omega_{3,k} \right\} \quad (7)$$

式中:  $N$  是专家数量;  $\mathbf{W}_1$ 、 $\mathbf{W}_2$ 、 $\mathbf{W}_3$  分别是属于导线、杆塔和绝缘子的第三层级权重系数向量;  $\boldsymbol{\Omega}$  是第二层级权重系数向量。

## 2.2 关键特征量的归一化处理

由于不同关键特征量所代表的含义不同, 且数量级差别巨大, 而线路健康指数是一个介于(0, 5]的无量纲数值, 因此需要对关键特征量的实测数据进行归一化处理。

一般情况下, 线路各参量的出厂值为调试好的合理值。随着时间推移, 部分参数量会出现偏差, 偏移量越大, 健康状况越不佳。对于上述情况, 最为方便的描述就是线性归一化。健康指数越接近 5 表征健康状态越好, 越接近 0 表征健康状态越差。具体方法如下: 设某项关键特征量的出厂值为  $y_0$  (线路出厂时该项关键特征量的初始值, 对应健康指数为 5), 界限值为  $y_1$  (该项关键特征量处于正常和不正常分界点的数值, 对应健康指数为 3), 实测值为  $y$ , 则健康指数  $x$  可由式(8)表示。

$$x = ay + b \quad (8)$$

式中,  $a$ 、 $b$  为转换系数。根据出厂值 ( $y_0, 5$ ) 和界限值 ( $y_1, 3$ ), 得到

$$a = \frac{2}{y_0 - y_1} \quad (9)$$

$$b = \frac{3y_0 - 5y_1}{y_0 - y_1} \quad (10)$$

将式(9)、式(10)代入式(8), 得到

$$x = \frac{2y}{y_0 - y_1} + \frac{3y_0 - 5y_1}{y_0 - y_1} \quad (11)$$

对于无法通过上述方式处理的某些定性关键特征量, 比如导线断股、树障、雷电等, 本文根据相关导则或业界公认的定性评价方法, 在得到具体评价等级后, 计算对应的健康指数, 如表 4 所示。

值得说明的是, 表 4 中不同关键特征量、不同等级对应的健康指数, 主要根据相应等级下不同关键特征量确定对线路健康状态的影响程度。例如, 对于关键特征量“导线断股”的“中度断股”情况, 考虑其虽然属于一般缺陷范畴, 但缺陷较轻, 对线路影响不大, 因此将其设置为一个比 3 分略低的数值 2.9 分。又如, 对于关键特征量“强降雨”的“黄色级别”情况, 考虑到 12 h 内雨量仅为 5~14.9 mm, 或 24 h 内雨量仅为 10~24.9 mm, 对线路健康状态影响很小, 因此将其定义为亚健康, 取 3 至 4 分的中间值 3.5 分。

由于不同关键特征量相同档级对线路健康状态的影响不同, 因此难以将其统一为一个确定值。本文在研究过程中, 通过参考《配网设备状态检修导则》《配网设备状态评价导则》, 并分析历史数据中关键特征量在不同情况下对线路状态的影响, 在保证对线路健康状态正确分级的条件下, 确定了相应的数值。

## 2.3 架空线路健康指数的计算步骤

本文将架空线路健康指数计算分为 7 个步骤: 首先, 根据架空线路特征, 将影响线路健康状态的因素分解为若干层次结构。其次, 利用专家研讨法确定各层级权重系数向量, 并对原始关键特征量数据进行归一化处理, 得到关键特征量归一化值集合。再次, 找出健康状态最差的关键特征量, 并计算关键特征量当前状态与其最好、最差状态的距离。最后, 根据最差关键特征量取值范围, 分情况计算线路组成部件的健康状态数值, 并加权计算出线路总体健康指数。具体运算步骤如下所述。

步骤 1: 根据前文分析, 将架空线路作为第一层级, 导线、杆塔、绝缘子作为第二层级, 第二层级下的各个关键特征量组成第三层级。图 3 为线路健康指数计算的层级说明。

步骤 2: 通过专家研讨方式, 确定第二、三层级

表 4 定性关键特征量健康指数的归一化处理

Table 4 Normalization of qualitative key characteristic of quantity health index

关键特征量	等级		等级说明	健康指数
导线断股	0	无断股	导线无断股。	断股等级 0/1/2/3/4 分别对应 5/2.9/2/1/0。
	1	有断股(轻度)	导线断股面积占总面积的 4%及以下。	
	2	有断股(中度)	导线断股面积占总面积的(4%~7%)。	
	3	有断股(重度)	导线断股面积占总面积的(7%~25%)。	
	4	有断股(严重)	导线断股面积超过总面积的 25%。	
树障	0	无树障	线路附近无树障。	树障等级 0/1/2/3 分别对应 5/3/2/1。
	1	轻度树障	线路附近保护区内零星种植树木, 近年内对线路不构成威胁。	
	2	中度树障	超高树木倒向线路侧时不能满足安全距离者; 线路保护区外建房、因超高有可能发生高空落物砸向导线。	
	3	重度树障	线路保护区内大面积种植高大乔木树; 线路通道内违章建房; 在杆塔与拉线之间修筑道路。	
雷电	0	绿色级别	6 h 内发生雷电活动的可能性很小。	雷电等级 0/1/2/3 分别对应 5/2.9/2/1。
	1	黄色级别	6 h 内可能发生雷电活动, 可能造成雷电灾害事故。	
	2	橙色级别	2 h 内发生雷电活动的可能性很大, 或者已经受雷电活动影响, 且可能持续, 出现雷电灾害事故的可能性比较大。	
	3	红色级别	2 h 内发生雷电活动的可能性非常大, 或者已经有强烈的雷电活动发生, 且可能持续, 出现雷电灾害事故的可能性非常大。	
强降雨	0	绿色级别	12 h 内雨量小于 5 mm, 或 24 h 内雨量小于 10 mm。	降雨等级 0/1/2/3 分别对应 5/3.5/2.5/2。
	1	黄色级别	12 h 内雨量为 5~14.9 mm, 或 24 h 内雨量为 10~24.9 mm。	
	2	橙色级别	12 h 内雨量为 15~29.9 mm, 或 24 h 内雨量为 25~49.9 mm。	
	3	红色级别	12 h 雨量大于等于 30 mm, 或 24 h 雨量大于等于 50 mm。	
绝缘子污秽度	0	0 级	离大中城市、海岸、盐场 30~50 km 以上的无明显工业污染、人口密度低的地区, 参考盐密小于 0.03 mg/cm <sup>3</sup> , 大气质量指数小于 0.4, 且 SO <sub>2</sub> 、NO <sub>2</sub> 、TSP 极限浓度低于国家大气质量标准 1 级。	污秽度等级 0/1/2/3/4 分别对应 5/4.5/3.5/2.5/2。
	1	1 级	距大中城市及工业区积污期主导风下风 15~30 km 及更远, 或工业废气排放强度小于 1000 万标 m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> 及人口密度 500~1000 人/km <sup>2</sup> 的乡镇区域, 或重要交通干线沿线 1 km 内, 离海岸、盐场 10~30 km, 积污期干旱少雾的内陆盐碱(含盐量小于 0.3%)地区。参考盐密 0.03~0.06 mg/cm <sup>2</sup> , 大气质量指数 0.4~0.8。	
	2	2 级	距大中城市及工业区积污期主导风下风 15~20 km, 各大集中工业区内乡镇工业废气排放强度不大于 1000~3000 万标 m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> 及人口密度 1000~10 000 人/km <sup>2</sup> 的乡镇区域, 或重要交通干线沿线 0.5 km 及一般交通线 0.1 km 内, 离海岸、盐场 3~10 km, 退海轻盐碱或内陆中等盐碱(含盐量 0.3%~0.6%)地区及积污期有持续大雾或融冰雪的 I 类地区。参考盐密 0.06~0.1 mg/cm <sup>2</sup> , 大气质量指数 0.8~1.3。	
	3	3 级	距大中城市及工业区积污期主导风下风 5~10 km, 距独立化工及燃煤工业源 0.5~2 km, 乡镇工业密集区及重要交通干线 0.2 km 内, 人口密度大于 10 000 人/km <sup>2</sup> 的居民区和交通枢纽, 近海 1~3 km 和重盐碱(含盐量 0.6%~1%)地区及积污期有持续大雾或融冰雪的 II 类地区。参考盐密 0.1~0.25 mg/cm <sup>2</sup> , 大气质量指数 1.3~3.2。	
	4	4 级	在化工、燃煤工业源区内及距此类独立工业源 0.5 km 内, 沿海 1 km 和含盐量大于 1.0% 的盐土地区。参考盐密 >0.25 mg/cm <sup>2</sup> , 大气质量指数 >3.2。	

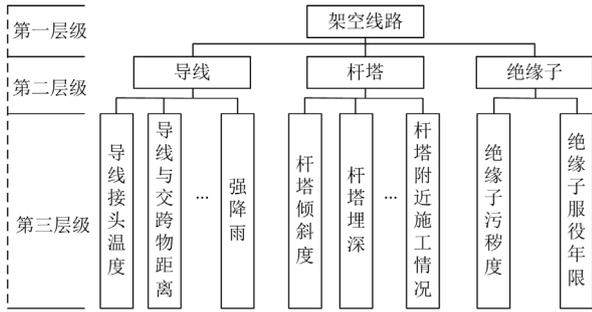


图3 架空线路健康指数计算层级划分

Fig. 3 Classification of health index calculation levels for overhead lines

的权重系数向量。第二层级权重系数向量为  $\Omega = \{\omega_1, \omega_2, \omega_3\}$ ,  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$  表示导线、杆塔、绝缘子的权重值, 下文用  $\omega_j$  表示,  $j=1, 2, 3$ 。第三层级的权重系数向量为  $W_j = \{w_{j,1}, w_{j,2}, \dots, w_{j,m}\}$ , 用  $w_{j,i}$  表示单项关键特征量的权重值,  $j=1, 2, 3, i=1, 2, \dots, m$ ,  $m$  为导线、杆塔、绝缘子类别下的第三层级特征量的个数。

本文以江苏地区的架空线路为对象开展专家研讨, 研讨过程邀请 10 位专家, 研讨分 3 次进行。表 5 为研讨获得的架空线路权重系数分配情况。

表 5 110 kV 架空线路权重系数表

Table 5 Weight coefficient table for 110 kV overhead lines

组成部件	关键特征量	权重/%
导线(40%)	导线接头温度	8
	导线与交跨物距离	8
	导线弧垂	8
	导线等效服役年限	1.2
	导线断股	8
	导线散股	5
	导线金具外观	6
	树障	16.5
	雷电	11
	大风	16.5
杆塔(40%)	强降水	11
	杆塔倾斜度	25.5
	杆塔埋深	25.5
	接地电阻	19
绝缘子(20%)	杆塔附近施工情况	30
	绝缘子污秽度	80
	绝缘子服役年限	20

步骤 3: 对第三层级的原始特征量数据进行归一化处理, 获得关键特征量的归一化数值集合  $X = \{X_1, X_2, X_3\}$ , 其由归一化值向量  $X_j (j=1, 2, 3)$  组成。  $X_j = \{x_{j,1}, x_{j,2}, \dots, x_{j,m}\}$  为导线、杆塔、绝缘

子的归一化值向量, 其中  $x_{j,i}$  为导线、杆塔、绝缘子类别下第三层级特征量的原始数据经过归一化处理后的数值, 范围为  $(0, 5]$ ,  $i=1, 2, \dots, m$ ,  $m$  为导线、杆塔、绝缘子类别下第三层级特征量的个数。

步骤 4: 找出导线、杆塔、绝缘子类别下第三层级特征量中健康状态最差的项。设  $x_{j,i}^+$ 、 $x_{j,i}^-$  分别是关键特征量健康状态最优、最差时对应的归一化值, 其中  $j=1, 2, 3, i=1, 2, \dots, m$ ,  $m$  为导线、杆塔、绝缘子类别下第三层级特征量的个数。那么, 利用式(12)可以分别计算第二层级下各个特征量与其最差状况之间的相对距离最小值  $m_j$ 。对应的该项特征量归一化值  $x_{j,i}$  为  $x_{j,\min}$ , 表示导线、杆塔、绝缘子类别下的第三层级单项特征量中健康状态最差项的归一化值。

$$m_j = \text{Arg Min}_i \left( \left\{ \frac{x_{j,i} - x_{j,i}^-}{x_{j,i}^+ - x_{j,i}^-} \mid i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, 3 \right\} \right) \quad (12)$$

步骤 5: 计算第二层级指标的待评估状态与其最优、最差状态的距离。设  $S_j^+$ 、 $S_j^-$  分别为第二层级指标的当前状况与最佳状况、最差状况之间的距离 ( $j=1, 2, 3$ ), 则以导线为例, 如图 4 所示, 横、纵坐标分别为属于导线类别下的关键特征量 L、P 的归一化值。用  $X^-$  表示关键特征量 L、P 的归一化值最小时导线所处的状态,  $X^+$  表示关键特征量 L、P 的归一化值最大时导线所处的状态,  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$  表示导线的 3 种待评估状态, 则  $S^-$  为导线待评估状态  $X_2$  与最差状态的欧式距离,  $S^+$  为导线待评估状态  $X_2$  与最优状态的欧式距离。

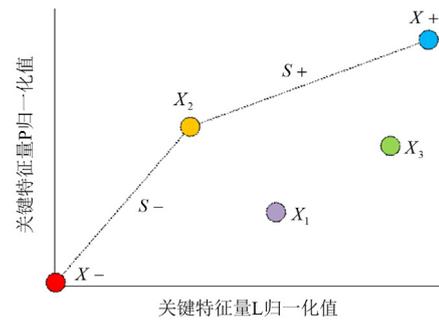


图4 关键特征量当前状态与最优、最差状态的欧式距离

Fig. 4 Euclidean distance between the current state of key feature quantities and the optimal and worst-case states

根据优劣解距离法, 利用式(13)、式(14)分别计算架空线路导线、杆塔、绝缘子 3 个指标的  $S_j^+$  与  $S_j^-$  值。式中,  $x_{j,i}$  是关键特征量的归一化值,  $x_{j,i}^+$ 、 $x_{j,i}^-$  分别是关键特征量健康状态最优、最差时对应的归

一化值,  $w_{j,i}$  是关键特征量的权重系数, 其中  $j = 1, 2, 3$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$ ,  $m$  为导线、杆塔、绝缘子类别下第三层级特征量的个数。

$$S_j^+ = \sqrt{\sum_{i=1}^m w_{j,i} \times \left( \frac{x_{j,i} - x_{j,i}^+}{x_{j,i}^+ - x_{j,i}^-} \right)^2} \quad (13)$$

$$S_j^- = \sqrt{\sum_{i=1}^m w_{j,i} \times \left( \frac{x_{j,i} - x_{j,i}^-}{x_{j,i}^+ - x_{j,i}^-} \right)^2} \quad (14)$$

步骤 6: 定义  $H_j$  为导线、杆塔、绝缘子 3 个指标的健康状态值, 其中  $j = 1, 2, 3$ 。利用式(15)定义一个中间值  $R_j$ , 表示导线、杆塔、绝缘子 3 个指标当前状态与最好、最差健康状态的相对距离。

$$R_j = \frac{S_j^-}{S_j^+ + S_j^-} \quad (15)$$

在架空线路健康指数的计算过程中, 只要线路的评价指标有一项处于一般缺陷、严重缺陷和危急缺陷等级, 那么线路总体健康状况也应当处于相应等级。另外, 某些关键特征量的轻微越限并不足以使线路出现一般缺陷, 只有当它们处于严重缺陷(即归一化值在 2 以下)时才会使线路也处于严重缺陷。这些关键特征量包括: 导线等效服役年限、雷电、大风、强降雨、杆塔附近施工情况、车辆撞杆统计情况、绝缘子服役年限。基于上述分析, 根据步骤 4 中获得的  $m_j$  值, 可分为 4 种情况计算  $H_j$  值。

(1) 当  $m_j > 0.6$ , 即所有指标都处于健康状态时,  $x_{j,\min} > 3$ , 健康状态相对距离值为导线、杆塔、绝缘子 3 个指标的健康状态计算数值, 如式(16)所示。

$$H_j = R_j \quad (16)$$

(2) 当  $0.4 \leq m_j \leq 0.6$ , 即存在指标的健康情况处于一般缺陷时,  $2 \leq x_{j,\min} \leq 3$ , 令  $x_{j,\min}$  的值为  $x_{j,i}^+$ , 即数值 5, 通过式(13)一式(15)求出相对距离值  $R_j$ 。为满足约束条件, 通过式(17)计算导线、杆塔、绝缘子的健康状态数值  $H_j$ 。

$$H_j = 5 \times [m_j + R_j(0.6 - m_j)] \quad (17)$$

(3) 当  $0.2 \leq m_j < 0.4$ , 即存在指标的健康情况处于严重缺陷时,  $1 \leq x_{j,\min} < 2$ , 同样通过式(13)一式(15)求出相对距离值  $R_j$ , 并通过式(18)计算导线、杆塔、绝缘子的健康状态数值  $H_j$ 。

$$H_j = 5 \times [m_j + R_j(0.4 - m_j)] \quad (18)$$

(4) 当  $0 < m_j < 0.2$ , 即存在指标的健康情况处

于危急缺陷,  $0 < x_{j,\min} < 1$ , 用同样的方法求出相对距离值  $R_j$ , 并通过式(19)计算导线、杆塔、绝缘子的健康状态数值  $H_j$ 。

$$H_j = 5 \times [m_j + R_j(0.2 - m_j)] \quad (19)$$

步骤 7: 在得到导线、杆塔、绝缘子 3 个指标的健康状态数值  $H_1$ 、 $H_2$ 、 $H_3$  后, 利用式(20)计算架空线路总体健康指数  $H$ 。式中,  $\omega_j$  是导线、杆塔、绝缘子的权重系数, 其中  $j = 1, 2, 3$ 。

$$H = \sum_{j=1}^3 H_j \times \omega_j \quad (20)$$

### 3 基于健康指数的架空线路运行状态评估

为了验证计算方法的有效性, 本文选取南京地区某 110 kV 架空线路, 采集了其关键特征量, 利用上述方法对线路总体健康指数进行评估, 并与实际运行情况进行比对。表 6 为上述地区某 110 kV 架空线路的导线、杆塔和绝缘子的出厂值、界限值和实测值。其中, 弧垂(%)的数值表示当前弧垂量相较于初始量的偏移百分比。利用上述方法得到的导线、杆塔和绝缘子的单项得分亦如表 6 所示。根据各单项得分, 依据本文在第 2 节中所提出的方法, 得到线路的总体健康指数  $H$  为 2.96, 其表明线路处于“一般缺陷”状态。

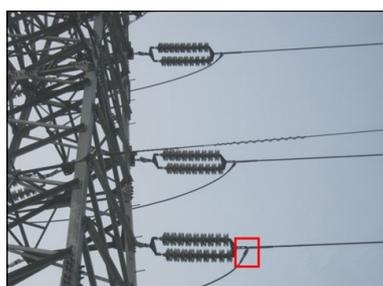
表 6 南京某 110 kV 架空线路的导线、杆塔和绝缘子参数

Table 6 Parameters of conductors, towers, and insulators for a 110 kV overhead line in Nanjing

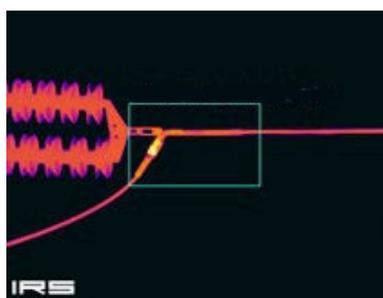
关键特征量	出厂值	界限值	实测值	得分
接头温度/°C	25	40	47.13	2.0
与交跨物距离	150	100	120	3.8
百分比/%				
弧垂/%	0	6	3	4.0
等效服役年限/年	0	30	21	3.6
导线				
断股(股)	0	1	0	5.0
散股(股)	0	0	0	5.0
金具外观	0	0	0	5.0
树障	0	1	0	5.0
雷电	0	1	0	5.0
大风	0	7	2	5.0
强降雨	0	1	1	3.0
杆塔				
倾斜度(°)	0	0.01	0.007	3.6
埋深/m	1.2	0.6	0.7	3.3
接地电阻/Ω	0	15	11	3.5
附近施工情况	0	0	0	5.0
绝缘子				
污秽度	0	2	0	5.0
服役年限/年	0	20	15	3.5

值得说明的是, 利用本文所提出的方法对架空线路进行评估时, 运维人员重点需要关注两类数值。一类是线路最终的健康指数数值  $H$ , 表征架空线路的状态分级; 另一类是各个关键特征量的具体评分。最终健康指数方面, 当线路评分大于 4 分时, 代表线路非常健康; 当线路评分处于 3 至 4 分之间时, 提示运维人员需密切关注线路状态变化; 当线路评分小于 3 分时, 提示线路处于一般缺陷、严重缺陷或者危急缺陷状态, 意味着线路需要维修, 工作人员需进一步关注各个关键特征量的评分, 以便于开展针对性维修。

根据上述原则, 由于线路总体健康指数得分为 2.96, 需进一步关注各个关键特征量的评分。由表 6 可知, 缺陷原因为导线接头温度过高, 需要提前安排检修计划。图 5 为该线路红外接头的实拍图。可见, 借助本文所提出的方法可以很好地反映架空线路的健康状态, 并为后期运维人员维修提供支撑。



(a) 接头实拍图



(b) 红外成像图

图 5 110 kV 架空线路接头温度实拍图及红外成像图

Fig. 5 Real temperature and infrared imaging images of 110 kV overhead line joints

## 4 结论

本文提出了一种可对架空线路运行健康状况进行评估的方法。该方法在全面考虑导线、杆塔、绝缘子等线路的本身因素及外部因素的基础上, 利用层次分析法建立影响线路健康状况的 3 级关键因素及其影响系数, 并采取定量、定性相结合的方式, 实

现了基于健康指数的架空线路各组成部分及线路整体的运行状态综合评估。通过对南京地区某 110 kV 架空线路的运行状态进行计算与实测评估, 验证了所提方法的有效性。本文所提方法也可用于其他电压等级架空线路或地下电缆的健康状况评估, 相关研究结果不仅可为线路运行状态评估提供理论基础, 还可为线路参数的优化设计提供有益借鉴。

## 参考文献

- [1] 马国明, 王思涵, 秦炜淇, 等. 输电线路运行状态光纤感知研究与展望[J]. 高电压技术, 2022, 48(8): 3032-3047. MA Guoming, WANG Sihan, QIN Weiqi, et al. Research and prospect in optical fiber sensing of transmission line operating conditions[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 3032-3047.
- [2] 宋云海, 张厚荣, 郑文坚, 等. 采用面向直流架空输电线路运行状态监测的新型非接触式电流传感器[J]. 电气自动化, 2020, 42(4): 89-91. SONG Yunhai, ZHANG Hourong, ZHENG Wenjian, et al. New type of non-contact current sensor for monitoring the operation state of the DC overhead transmission line[J]. Electrical Automation, 2020, 42(4): 89-91.
- [3] 占亚波, 徐潜, 李俊, 等. 大规模输电线路状态监测传感器网络的周期性低功耗通信技术方案[J]. 电信科学, 2023, 39(2): 83-91. ZHAN Yabo, XU Qian, LI Jun, et al. Periodic low-power communication technology scheme for large-scale transmission line condition monitoring sensor network[J]. Telecommunications Science, 2023, 39(2): 83-91.
- [4] 左鹏奇. 基于无线传感网络的输电线路状态监测关键技术研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2022. ZUO Pengqi. Research on key technology of transmission line condition monitoring based on wireless sensor network[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2022.
- [5] 杨磊. 输电线路运行状态监测系统同步测量装置的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016. YANG Lei. Research on synchronous measurement unit in transmission line condition system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.
- [6] 杨芳, 唐小亮, 尹文阔, 等. 基于多参量分布式光纤传感的架空输电线路风振监测分析[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(11): 169-177. YANG Fang, TANG Xiaoliang, YIN Wenkuo, et al. Analysis of transmission line wind vibration monitoring based on a multi parameter distributed optical fiber sensor[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(11): 169-177.
- [7] 张永谦. 高压输电线路运行状态在线监测系统的研究与应用[D]. 北京: 华北电力大学, 2017. ZHANG Yongqian. Research and application of online monitoring system of running state of high voltage transmission line[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.

[8] 赵文彬, 李慧星, 费正明, 等. 基于智能电网需求的输电线路状态监测系统建设[J]. 华东电力, 2010, 38(8): 1212-1216.  
ZHAO Wenbin, LI Huixing, FEI Zhengming, et al. Construction of transmission line state detection system based on smart grid requirements[J]. East China Electric Power, 2010, 38(8): 1212-1216.

[9] 王凯, 蔡炜, 邓雨荣, 等. 输电线路在线监测系统应用和管理平台[J]. 高电压技术, 2012, 38(5): 1274-1280.  
WANG Kai, CAI Wei, DENG Yurong, et al. Application and management information platform for transmission line monitoring system[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(5): 1274-1280.

[10] 王海洋, 宫炜南, 赵忠强. 基于物联网的电网输电线路状态监测研究[J]. 电气应用, 2020, 39(9): 76-78.  
WANG Haiyang, GONG Weinan, ZHAO Zhongqiang, et al. Research on state monitoring of power transmission lines based on the internet of things[J]. Electrotechnical Application, 2020, 39(9): 76-78.

[11] 李培源. 基于物联网技术的输电线路状态智能传感与监测系统研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2022.  
LI Peiyuan. Research on intelligent sensing and monitoring system for transmission line status based on internet of things technology[D]. Chongqing: Chongqing University, 2022.

[12] 陈金熠, 范金菊, 胡天强. 考虑架空输电线路状态的线路覆冰监测系统的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(15): 93-98.  
CHEN Jinyi, FAN Jinju, HU Tianqiang. Research on line ice monitoring system considering the status of overhead transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(15): 93-98.

[13] 叶万余, 苏超, 罗敏辉, 等. 基于关联规则挖掘的输电线路缺陷状态预测[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(20): 104-111.  
YE Wanyu, SU Chao, LUO Minhui, et al. Transmission line defect state prediction based on association rule mining[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(20): 104-111.

[14] ZHAO Long, ZHANG Tian, HUANG Xinbo, et al. A structural health monitoring system of the overhead transmission line conductor[J]. IET Science Measurement & Technology, 2022, 16(1): 28-39.

[15] SHARIATINASAB R, SAFAR J G. Probabilistic evaluation of lightning performance of overhead distribution lines using Monte Carlo method[C] // 2012 Proceedings of 17th Conference on Electrical Power Distribution, May 2-3, 2012, Tehran, Iran: 1-7.

[16] YUAN Zhikang, YANG Zhouhang, JIN Lijun, et al. Technique for order preference by similarity to an ideal solution-based comprehensive health assessment of composite insulators for overhead transmission lines[J]. High Voltage, 2023(8): 149-157.

[17] 配网设备状态检修导则: Q/GDW 644—2011[S]. 北京: 国家电网公司, 2011.

[18] 配网设备状态评价导则: Q/GDW 645—2011[S]. 北京: 国家电网公司, 2011.

[19] RIDWAN M I, YEN K L, MUSA I A, et al. Reliability and availability assessment of transmission overhead line protection system using reliability block diagram[C] // 2010 IEEE International Conference on Power and Energy, Kuala Lumpur, Malaysia: 964-969.

[20] FERREIRA V H, LOPES D S, FORTES M Z, et al. Autonomous Bayesian neural models for fault diagnosis in transmission lines[C] // 2017 IEEE Manchester Power Tech, June 18-22, 2017, Manchester, UK, 2017: 1-6.

[21] HENRI M, JAKO K, MART L. A holistic risk-based maintenance methodology for transmission overhead lines using tower specific health indices and value of loss load[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 137.

[22] LUEJAI W, SUWANASRI T, SUWANASRI C. Condition assessment of overhead transmission line using weighting and scoring method and IT application[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2021(6): 2981-2993.

[23] 孙黎霞, 王中一, 戴洪, 等. 计及网络结构的配电网健康状态评估方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(4): 64-74.  
SUN Lixia, WANG Zhongyi, DAI Hong, et al. The health state assessment method of a smart distribution network considering network structure[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(4): 64-74.

[24] 刘军, 安柏任, 张维博, 等. 大型风力发电机组健康状态评价综述[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(1): 176-187.  
LIU Jun, AN Bairen, ZHANG Weibo, et al. Review of health status evaluation of large wind turbines[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(1): 176-187.

[25] 杨春波, 陶青, 张健, 等. 基于综合健康指数的设备状态评估[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(10): 104-109.  
YANG Chunbo, TAO Qing, ZHANG Jian, et al. Equipment status evaluation based on comprehensive health index[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(10): 104-109.

[26] 国家电网公司. 城市配电网月度分析报告[R]. 北京: 国家电网公司, 2011.

[27] 北京丰台电力公司. 2016年架空线路故障数据报告[R]. 北京: 北京丰台电力公司, 2016.

收稿日期: 2023-09-11; 修回日期: 2024-04-01

作者简介:

高飞(1982—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要研究方向为变电设备新技术研发与应用, 变电站智能运维技术。E-mail: 12676166@qq.com

(编辑 魏小丽)