

文章编号:1671-251X(2019)06-0047-05

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2019010064

基于信息融合的矿用电缆状态检修方法

胡媛媛¹, 李乐乐²

(1. 运城职业技术学院 矿山工程系, 山西 运城 044000;
2. 国网新绛县供电公司, 山西 新绛 043100)



扫码移动阅读

摘要:针对矿用电缆单一参数在线监测方法准确度低、多参数监测方法未根据专家经验进行权重分配并进行信息融合等问题,提出了基于信息融合的矿用电缆状态检修方法。通过多个分布式传感器实时监测电缆运行时的表面温度、护套接地电流、局部放电量,根据模糊理论对多源信息进行初步融合诊断,将融合结果作为D-S证据理论的识别框架和证据体;根据专家经验确定各运行参数的权重,结合初步诊断结果,确定证据理论的合理信度函数分配值,根据信度最大准则判断被测电缆的工作状态。实例分析结果验证了该方法能有效融合处理矿用电缆的多源信息,提高故障诊断的准确性。

关键词:矿用电缆; 状态检修; 故障诊断; 信息融合; 模糊理论; D-S证据理论
中图分类号:TD61 文献标志码:A

Mine cable state maintenance method based on information fusion

HU Yuanyuan¹, LI Lele²

(1. Department of Mining Engineering, Yuncheng Polytechnic College, Yuncheng 044000, China;
2. State Grid Xinjiang County Power Supply Company, Xinjiang 043100, China)

Abstract:In view of problems of low accuracy of online monitoring method of mine cable using single parameter, and that monitoring method using multi-parameter does not carry out weight distribution and information fusion based on expert experience, a mine cable state maintenance method based on information fusion was proposed. Distributed sensors are used to real-timely monitor surface temperature, grounding current of cable sheath and partial discharge during cable operation. Preliminary fusion diagnosis for multi-source information is carried out according to fuzzy theory. The fusion results are used as identification framework and evidence body of D-S evidence theory. The weight of each operating parameter is determined based on expert experience, and reasonable reliability function allocation value of the evidence theory is determined combined with the preliminary diagnosis results, then the working state of the tested cable is judged according to the maximum reliability criterion. The example analysis result proves that the method can effectively integrate multi-source information of mine cable and improve accuracy of fault diagnosis.

Key words: mine cable; state maintenance; fault diagnosis; information fusion; fuzzy theory; D-S evidence theory

0 引言

随着智能化、无人化矿山的建设,对矿山供电的

安全性、稳定性、准确性和灵敏性等要求越来越高。矿用电缆的计划检修和故障维修方法存在很大的盲目性,已不能满足要求。因此,对井下电缆的运行状

收稿日期:2019-01-16;修回日期:2019-05-15;责任编辑:胡娴。
基金项目:高等学校科技创新项目(201701D31111191)。
作者简介:胡媛媛(1986—),女,河南商丘人,讲师,硕士,主要研究方向为矿井供电监测监控,E-mail:huyuan860810@126.com。
引用格式:胡媛媛,李乐乐.基于信息融合的矿用电缆状态检修方法[J].工矿自动化,2019,45(6):47-51.
HU Yuanyuan, LI Lele. Mine cable state maintenance method based on information fusion[J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(6): 47-51.

态进行实时监测,对电缆故障进行有效预警,成为智能矿山发展的重点研究内容之一^[1-2]。

目前矿用电缆状态检修方法多是依赖单一实时运行参数,监测数据超出设置范围即认为出现故障,难以保证故障诊断的准确性^[3-5]。工程应用较多的电缆在线监测方法主要有分布式光纤测温、护套电流监测、局部放电监测等。分布式光纤测温容易受到井下环境温度、湿度等影响^[6-7];护套电流监测能够小范围地实现故障快速定位,但需加强护套电流与故障类型之间的对应关系^[8-9];局部放电监测可以对电缆本体、接头、终端头等进行全方位监测并准确定位放电源,但电缆局部放电量和电缆剩余寿命之间的对应关系不能确定^[10-11]。

多参数综合评估方法可以准确、高效地进行电缆状态检修和故障预测^[12-14]。但大部分现有研究没有根据行业专家经验分析各参数对应运行状态的权重,未对采集的信息进行融合,相关系统缺少自主学习更新能力。因此,本文提出了一种基于信息融合的矿用电缆状态检修方法。利用在矿用电缆线路中分布的多种传感器来监测电缆运行参数,根据专家经验调整各参数的权重系数,引入模糊数学和D-S证据理论综合分析所有数据,充分融合各参数之间的冗余和互补信息,在实际运行中不断优化,得出较准确的状态检修和故障预测结果,提高电缆运行状态检修的准确性和可靠性。

1 矿用电缆状态检修流程

基于信息融合的矿用电缆状态检修流程如图 1 所示。实时运行参数监测主要包括分布式光纤测温、护套接地电流监测和局部放电监测 3 个部分。每个监测子系统都有多个分布式传感器,所有传感器通过物联网技术接入到一个网络内,实现多源数据传输与存储。数据处理部分引入模糊数学对电缆的多种在线监测信息进行初步融合诊断,融合结果作为 D-S 证据理论的识别框架和证据体;将初步融合结果、专家经验数据归一化到证据理论的可信度分配中,利用 D-S 证据理论进行多源信息融合和故障诊断,评估矿用电缆运行状态。

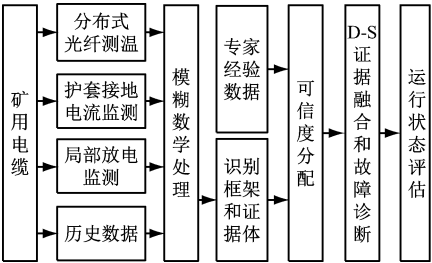


图 1 矿用电缆状态检修流程

Fig. 1 Status maintenance process of mine cable

分布式光纤测温可以单独设置每个测温点的报警值,支持差温、定温、平均温度等阈值报警方式。将测温光纤紧密缠绕在绝缘屏蔽层表面,利用电缆表面测温结果反推导体温度,可以监测到电缆沿线各点的实时温度状况。电缆护套接地电流可反映被测电缆的外绝缘状态,利用电流互感器测取电缆接地线电流信号。局部放电监测采用电磁耦合法,主要测量位置在电缆终端金属屏蔽层接地引线处。

2 基于模糊理论的参数信息融合

矿用电缆的故障性质与运行参数之间是一种模糊关系,存在大量的不确定性且易受环境影响。因此,引入模糊数学对被测设备的多种运行参数进行初步融合^[15-16]。

电缆故障现象与故障类型之间不是绝对的隶属关系。假设被测电缆的故障现象有 c 种,表示为 $x_1, x_2, \dots, x_c$;可能出现的故障类型有 d 种,表示为 $y_1, y_2, \dots, y_d$;两者用向量表示为

$$\mathbf{X} = (\mu_{x_1}, \mu_{x_2}, \dots, \mu_{x_c}) \tag{1}$$

$$\mathbf{Y} = (\mu_{y_1}, \mu_{y_2}, \dots, \mu_{y_d}) \tag{2}$$

式中: μ_{x_i} ($i=1, 2, \dots, c$)表示被测电缆对故障现象 x_i 的隶属度; μ_{y_j} ($j=1, 2, \dots, d$)表示被测电缆对故障类型 y_j 的隶属度。

将故障现象 x_i 对应故障类型 y_j 的可能性记为 r_{ij} , $0 \leq r_{ij} \leq 1$,则 c 个故障现象对应的 d 个故障类型的可能性组合可构成一个 $c \times d$ 的模糊变换矩阵 $\mathbf{R}$,模糊关系方程为

$$\mathbf{Y} = \mathbf{X} \mathbf{R} \tag{3}$$

已知故障现象集 $\mathbf{X}$,利用模糊变换矩阵 $\mathbf{R}$,求出故障状态集 $\mathbf{Y}$,再根据故障诊断规则可判断出电缆故障类型。由于井下电缆工作环境特殊,需综合专家经验,确定模糊变换矩阵的初始值,并在实际运行中不断优化,直到电缆故障现象与故障类型相对完全符合为止^[17]。

3 基于 D-S 证据理论的决策融合

仅利用模糊诊断规则进行独立的状态分析有可能出现模糊诊断结果,因此,需进一步改进数据融合方法。D-S 证据理论可以综合考虑多源不确定信息,对不确定性问题的描述更符合人们的思维习惯,能把多个单一的融合结果合成新的证据体,在一定决策与诊断规则下判断出设备故障类型^[18]。

3.1 识别框架与证据体

将证据理论应用在矿用电缆运行状态识别中,其识别框架为参数信息对应的所有可能的运行状态的集合,即利用模糊数据进行初步融合后的故障模式集合,表示为 $\Theta = \{A_1, A_2, \dots, A_d\}$, $A_1, A_2, \dots, A_d$ 为互斥子集。将被测电缆的分布式光纤测温数据、

护套接地电流、局部放电信息初步融合结果作为识别框架的证据体。

3.2 基本信度分配

被测设备的状态检修决策既要考虑初步融合结果对决策目标的客观影响,还要将行业专家的经验值映射到决策目标中去,即允许检修人员根据工作经验适当调整证据源信任度权重系数。证据体的客观权重由每个初步融合子网络的诊断能力和范围决定,客观权重向量表示为 $\mathbf{W}_k = (\omega_{k1}, \omega_{k2}, \dots, \omega_{kc})$; 证据体的主观权重由行业专家根据工作经验视被测设备的投入使用时间确定,主观权重向量表示为 $\mathbf{W}_s = (\omega_{s1}, \omega_{s2}, \dots, \omega_{sd})$ 。

结合主客观权重可得各证据体的综合权重为

$$\omega_i = \frac{\omega_{ki}\omega_{si}}{\sum_{i=1}^c \omega_{ki}\omega_{si}} \tag{4}$$

设第 i 个初步融合结果对应第 j 个故障的隶属度为 $O_i(j)$, 则初步融合子网络中对第 j 个故障的基本概率分配为

$$m_i(j) = \frac{O_i(j)\omega_i}{\sum_{j=1}^d O_i(j)} \tag{5}$$

对第 i 个证据体的不确定性的信任度分配为

$$m_{i\emptyset} = 1 - \omega_i \tag{6}$$

本文中,每个证据体的信任函数值就是该证据体的基本概率分配。

3.3 证据合成规则

设 Bel_1 和 Bel_2 为同一识别框架 Θ 下的 2 个信任函数, m_1 和 m_2 分别为对应的信度函数,若 $E \subseteq \Theta$ 且组合后的基本概率分配函数值 $m(E) > 0$, 则 E 为焦元。设 E_1 和 E_2 为 2 组焦元, 则多个证据之间的冲突系数 K 为

$$K = \sum_{E_1 \cap E_2 = \emptyset} m_1(E_1)m_2(E_2) \tag{7}$$

组合后的基本概率分配函数值 $m: 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$ 为

$$m(E) = \begin{cases} 0 & E = \emptyset \\ \frac{\sum_{E_1 \cap E_2 = E} m_1(E_1)m_2(E_2)}{1 - K} & E \neq \emptyset \end{cases} \tag{8}$$

如果 $K < 1$, 那么 $m(E)$ 有一个确定的概率分配值。记为 $\text{Bel}_1 \oplus \text{Bel}_2$ 。若 $K = 1$, 表明 m_1 和 m_2 矛盾, 不能对基本概率分配进行组合。先计算 2 个信度函数的合成, 然后逐一合成, 直到 c 个信度函数全部合成, 则 c 个信任函数的组合为

$$\text{Bel} = \{[(\text{Bel}_1 \oplus \text{Bel}_2) \oplus \text{Bel}_3] \oplus \dots\} \oplus \text{Bel}_c \tag{9}$$

通过证据组合规则得到识别框架中所有故障类型的信度分配, 根据信度最大准则判断被测电缆工

作状态。同时诊断结果应满足条件: 信度函数及两信度函数之差应大于设定阈值, 不确定度应小于设定阈值。若不满足上述条件, 可能会使诊断结果的可信度过低, 从而得不到正确的诊断结果。

4 实例分析

为验证基于信息融合的矿用电缆状态检修方法的实用性, 对某煤矿井下中央变电所一路长度为 200 m 的 10 kV MYJV 3×240 型矿用高压进线电缆进行运行状态监测和故障预测。

采集到矿用电缆的工作温度为 25 °C, 护套接地电流为 5 μA, 局部放电量为 3 pC。被测电缆的工作状态分为接地 F_1 、短路 F_2 、断线 F_3 、正常 F_4 , 设识别框架 $\Theta = \{F_1, F_2, F_3, F_4\}$ 。构建矿用电缆运行状态模糊变换矩阵 $\mathbf{R}$:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} \end{bmatrix} \tag{10}$$

矩阵 $\mathbf{R}$ 的行对应 3 个运行参数, 即电缆表面温度、护套接地电流、局部放电量, 列对应 4 个工作状态 $F_1 \sim F_4$, 元素值为参数对运行状态的隶属度。为求得 $\mathbf{R}$ 中的元素值, 需建立合适的隶属度函数。根据模糊理论确定 3 个运行参数的隶属度, 矿用电缆运行状态正常时监测参数只在正常范围内变动, 将要发生故障时才会偏离正常范围。参考矿用电缆在线监测数据分析专家的工作经验, 运用层次分析法得到模糊变换矩阵 $\mathbf{R}$:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0.0557 & 0.1950 & 0.0153 & 0.7340 \\ 0.4160 & 0.0950 & 0.0000 & 0.5890 \\ 0.4390 & 0.0630 & 0.0000 & 0.4980 \end{bmatrix} \tag{11}$$

从式(11)可以看出, 第 4 列电缆运行参数的值较大, 说明矿用电缆较大可能工作于正常状态, 此时利用实时监测数据完成了对矿用电缆工作状态的初步诊断。但由于被测电缆工作在井下较潮湿的环境中, 光纤测温取的是电缆表面温度, 采集温度数据时存在较多干扰, 仅利用监测数据进行诊断可能存在误差, 并且初步融合后电缆状态属于正常和接地故障的隶属度界限并不明显, 所以, 需要融合专家经验权值, 运用 D-S 证据理论来提高诊断精度。

综合考虑各诊断网络在矿用电缆运行状态评估中实际应用效果和故障诊断专家的经验, 将电缆表面温度、护套接地电流、局部放电量的权重分别取为 0.9, 0.8, 0.9。用式(5)得到识别框架内子集的基本可信度分配, 结果见表 1。

利用证据合成规则对表 1 中的数据进行综合。首先计算电缆表面温度与护套接地电流综合后的运行状态可信度分配 m_1 , 然后计算局部放电量与 m_1

表 1 电缆运行参数可信度分配
Table 1 Reliability distribution of cable
operating parameters

证据	$m_i(1)$	$m_i(2)$	$m_i(3)$	$m_i(4)$	$m_{\emptyset}$
电缆表面温度	0.050 1	0.175 5	0.013 8	0.660 6	0.1
护套接地电流	0.332 8	0.076 2	0	0.471 2	0.2
局部放电量	0.395 1	0.056 7	0	0.448 2	0.1

综合后的各运行状态可信度分配,得到 $m_i(1)$, $m_i(2)$, $m_i(3)$, $m_i(4)$, $m_{\emptyset}$ 分别为 0.125 6, 0.039 8, 0.012 3, 0.816 9, 0.005 3。 $m_i(4)$ 明显大于其他值,说明 F_4 具有较大的信任度分配值,矿用电缆工作在正常状态,与实际的停电检查结果一致。

分析式(11)可知,仅利用在线监测信息或巡检信息对矿用变压器的运行状态进行判断时,出现了故障交叉模糊现象。而加入专家经验权值并利用 D-S 证据理论对初步融合结果进一步处理后,矿用电缆工作在正常状态的可信度增加了,属于其他故障状态的可信度降低,说明该方法可以明显改善诊断结果,准确度较高,能够更真实地反映被测电缆的运行状态。

5 结语

将 D-S 证据理论与模糊理论相结合,提出了一种基于信息融合的矿用电缆状态检修方法。利用模糊理论方法对被测电缆的多源信息分别进行量化处理,得到初步诊断结果,确定证据理论的识别框架和证据体;根据专家经验确定各运行参数的权重,利用 D-S 证据理论进行信息融合,充分挖掘不同信息之间的冗余和互补关系,得到基于多源信息融合的状态检修结果。实例分析结果验证了基于信息融合的矿用电缆状态检修方法可以提高电缆状态检修的准确性。随着传感器技术的不断发展,矿用电缆运行参数在线监测数据越来越精确,井下电缆实际监测经验越来越丰富,在今后的研究工作中可加入自主学习更新算法,进一步完善矿用电缆状态检修方法。

参考文献(References):

[1] 朱玉生. 基于物联网的输变电设备故障诊断[D]. 长沙:湖南大学,2013.

[2] 朱德恒,严璋,谈克雄,等. 电气设备状态监测与故障诊断技术[M]. 北京:中国电力出版社,2009.

[3] 郭创新,高振兴,张金江,等. 基于物联网技术的输变电设备状态监测与检修资产管理[J]. 电力科学与技术学报,2010,25(4):36-41.

GUO Chuangxin, GAO Zhenxing, ZHANG Jinjiang, et al. IOT based transmission and transformation equipment monitoring and maintenance assets management[J]. Journal of Electric Power Science

and Technology,2010,25(4):36-41.

[4] 王慧芳,杨荷娟,何奔腾,等. 输变电设备状态故障率模型改进分析[J]. 电力系统自动化,2011,35(16):27-31.

WANG Huifang, YANG Hejuan, HE Benteng, et al. Improvement of state failure rate model for power transmission and transforming equipment [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(16):27-31.

[5] 张怀宇,朱松林,张扬,等. 输变电设备状态检修技术体系研究与实施[J]. 电网技术,2009,33(13):70-73.

ZHANG Huaiyu, ZHU Songlin, ZHANG Yang, et al. Research and implementation of condition-based maintenance technology system for power transmission and distribution equipments[J]. Power System Technology,2009,33(13):70-73.

[6] 邱伟豪,阳林,郝艳捧,等. XLPE 电缆内置分布式光纤的温度监测试验[J]. 广东电力,2018,31(8):175-181.

QIU Weihao, YANG Lin, HAO Yanpeng, et al. Temperature monitoring experiment for XLPE built-in distributed optical fiber[J]. Guangdong Electric Power,2018,31(8):175-181.

[7] 阳林,史尊伟,黄吉超,等. 基于 BOTDR 分布式光纤传感技术的架空线路温度检测现场试验研究[J]. 高电压技术,2015,41(3):925-930.

YANG Lin, SHI Zunwei, HUANG Jichao, et al. Field test research on temperature detection of overhead transmission line based on BOTDR distributed fiber sensing technology [J]. High Voltage Engineering, 2015,41(3):925-930.

[8] 张潇,王彦文,赵永梅,等. 矿用高压电缆绝缘在线监测方法[J]. 工矿自动化,2017,43(4):60-63.

ZHANG Xiao, WANG Yanwen, ZHAO Yongmei, et al. Online monitoring method of mine-used high voltage cable insulation [J]. Industry and Mine Automation,2017,43(4):60-63.

[9] 杨静,朱晓岭,董翔,等. 基于护层电流的高压电缆故障在线监测和诊断[J]. 高电压技术,2016,42(11):3616-3625.

YANG Jing, ZHU Xiaoling, DONG Xiang, et al. On-line monitoring and diagnosis of HV cable faults based on sheath currents [J]. High Voltage Engineering,2016,42(11):3616-3625.

[10] 侯淞学,彭涛,王雪,等. 井下高压电缆局部放电及其传播特性研究[J]. 煤炭技术,2018,37(3):203-205.

HOU Songxue, PENG Tao, WANG Xue, et al. Study on partial discharge and propagation characteristics of underground high voltage cable[J]. Coal Technology, 2018,37(3):203-205.

[11] 万志强,宋建成,雷志鹏,等. 矿用干式变压器绝缘在线监测及故障诊断预警系统研制[J]. 工矿自动化,2013,39(10):1-5.

WAN Zhiqiang, SONG Jiancheng, LEI Zhipeng, et al. Development of system of on-line monitoring, fault diagnosis and prewarning for insulation of mine-used dry-type transformer [J]. Industry and Mine Automation, 2013, 39(10):1-5.

[12] MARZINOTTO M, MAZZANTI G. The feasibility of cable sheath fault detection by monitoring sheath-to-ground currents at the ends of cross-bonding sections [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(6):5376-5384.

[13] 龚瑞昆, 马亮, 赵延军, 等. 基于量子神经网络信息融合的变压器故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(23):79-84.

GONG Ruikun, MA Liang, ZHAO Yanjun, et al. Fault diagnosis for power transformer based on quantum neural network information fusion [J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(23):79-84.

[14] 夏向阳, 张琦, 李明德, 等. 证据理论与模糊理论集成的XLPE电缆绝缘状态评估研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(20):13-18.

XIA Xiangyang, ZHANG Qi, LI Mingde, et al. Research on insulation assessment of XLPE cables based on evidence and fuzzy theory integrated method [J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(20):13-18.

[15] 敖蕾蕾, 王慧芳, 张弛, 等. 基于D-S证据理论的输变电设备状态检修多目标群决策[J]. 电网技术, 2014, 38(6):1627-1633.

AO Leilei, WANG Huifang, ZHANG Chi, et al. Multi-objective and group decision-making research based on D-S evidence theory in condition-based maintenance for transmission and transformation equipment [J]. Power System Technology, 2014, 38(6):1627-1633.

[16] 符杨, 江玉蓉, 崔椿洪, 等. 基于模糊数学和概率论的变压器故障诊断[J]. 高电压技术, 2008, 34(5):1040-1044.

FU Yang, JIANG Yurong, CUI Chunhong, et al. Fuzzy theory and probability reasoning applied for identifying power transformer fault[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(5):1040-1044.

[17] 张文元, 赵卫国, 晋涛, 等. 多神经网络与证据理论的变压器故障诊断方法[J]. 高压电器, 2018, 54(8):207-211.

ZHANG Wenyuan, ZHAO Weiguo, JIN Tao, et al. Fault diagnosis method of transformer based on multi-neural network and evidence theory[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(8):207-211.

[18] 廖瑞金, 孟繁津, 周年荣, 等. 基于集对分析和证据理论融合的变压器内绝缘状态评估方法[J]. 高电压技术, 2014, 40(2):474-481.

LIAO Ruijin, MENG Fanjin, ZHOU Nianrong, et al. Assessment strategy for inner insulation condition of power transformer based on set-pair analysis and evidential reasoning decision-making [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(2):474-481.