

DOI: 10.7667/PSPC171614

## 基于对数正态分布的电缆状态评估方法研究

洪祎祺<sup>1</sup>, 魏丹萍<sup>1</sup>, 袁伟刚<sup>1</sup>, 袁浩悦<sup>1</sup>, 郭慧敏<sup>2</sup>, 王召林<sup>3</sup>

(1. 国网上海浦东供电公司, 上海 200122; 2. 上海中兴电力建设发展有限公司, 上海 200333;  
3. 中国电力科学研究院, 北京 102401)

**摘要:** 为了了解电缆在长时间使用后的健康状况, 通过对数正态分布和 Weibull 分布两种分布函数来进行电缆状态的评估。先假定电缆的介电损耗与局部放电数据符合两种分布, 借助于 Matlab 数值模拟软件对某供电公司近几年通过振荡波试验检测积累的老化数据进行了拟合, 并对两种拟合结果进行了对比分析。结果证明, 对数正态分布更符合电缆老化参数的分布。设定了电缆状态的三个级别, 通过建立状态评估模型, 并使用该模型完成对某供电公司 10 kV 电缆的状态评估。研究成果有助于及时了解电缆在运行过程中的状态变化, 并提出对应的检修计划。  
**关键词:** 电缆; 对数正态分布; Weibull 分布; 介电损耗; 局部放电; 状态评估

### Research on cable state evaluation method based on logarithmic normal distribution

HONG Yiqi<sup>1</sup>, WEI Danping<sup>1</sup>, YUAN Weigang<sup>1</sup>, YUAN Haoyue<sup>1</sup>, GUO Huimin<sup>2</sup>, WANG Zhaolin<sup>3</sup>

(1. State Grid Shanghai Pudong Electric Power Supply Company, Shanghai 200122, China;  
2. Shanghai Zhongxing Power Construction and Development Co., Ltd., Shanghai 200333, China;  
3. China Electric Power Research Institute, Beijing 102401, China)

**Abstract:** In order to know the health condition of the cable after prolonged use, the cable state is evaluated by logarithmic normal distribution and Weibull distribution. The distribution of the dielectric loss and partial discharge of the cable is assumed to conform to two different distributions. With the help of Matlab numerical simulation software, the aging data accumulated by a power supply company through oscillatory wave test in recent years is fitted. The comparison between the two fitting results shows that the logarithmic normal distribution is more accordant with the distribution of aging parameters of cables. Three levels of cable status are set, and a state assessment model is established and used to evaluate the state of 10 kV cable in a power company. The research results will help to understand the changes in the state of the cable during the operation and put forward the corresponding maintenance plan.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. GCB17201400106).

**Key words:** cable; logarithmic normal distribution; Weibull distribution; dielectric loss; partial discharge; state assessment

## 0 引言

电缆在长时间的使用后会发生老化现象, 且随着时间的推移老化现象越来越严重, 如果不及时发现并将其修补或替换会引起电缆事故, 严重时会导致停运<sup>[1]</sup>。因此有必要对运行过程中电缆的状态进行评估, 及时判断电缆是否完好对电缆维护和管理显得非常重要。电缆绝缘老化后会产生局部放电, 且随着老化程度的加深局部放电现象越来越明显, 且电缆的老化会增大介电损耗, 因此可以通过检查电缆的局部放电以及介电损耗情况判断电缆的运行

状况。目前国内外在这方面的相关资料较少。对数正态分布和 Weibull 分布两种分布常用来描述产品的寿命和可靠性分布, 相关方面的研究较多<sup>[4-6]</sup>。本文先假定电缆的介电损耗与局部放电数据符合两种分布, 借助于 Matlab 数值模拟软件对某供电公司在近几年里通过振荡波试验检测积累的老化数据进行拟合。并对两种拟合结果与实际的经验分布进行对比后得出对数正态分布更符合电缆的老化参数的分布。设定了电缆状态的三个级别, 建立状态评估模型, 并使用该模型完成对某供电公司 10 kV 电缆的状态评估。研究成果有助于及时了解电缆在运行过程中的状态变化以及提出对应的检修计划。

### 1 对数正态分布和 Weibull 分布模型函数

#### 1.1 对数正态分布

假定电缆在不断老化的条件下电缆介电损失服从对数正态分布，其密度函数为

$$f(t) = \begin{cases} \frac{1}{t\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2}}, & t > 0 \\ 0, & t \leq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中： $f(t)$  为标准正态分布的分布函数； $\mu$  为对数均值； $\sigma$  为对数标准差。

#### 1.2 Weibull 分布

假定电缆在不断老化的条件下电缆介电损失服从 Weibull 分布，其概率密度函数为

$$f(t) = \begin{cases} \frac{k}{\lambda} \left(\frac{t}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{t}{\lambda}\right)^k}, & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases} \quad (2)$$

累积分布函数为

$$F(t) = \begin{cases} 1 - e^{-\left(\frac{t}{\lambda}\right)^k} \\ 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中： $k$  为形状参数； $\lambda$  为尺度参数。

### 2 研究路线

研究路线如图 1 所示。其中，选择随机变量为选定表示电缆老化程度的一些特征参数；分布函数包括对数正态分布和 Weibull 分布；拟合度测试为确定数据拟合效果最优时的分布模型；选取状态区间表示对电缆老化级别的边界值和置信区间的选择；输出数据为对边界值和置信区间进行输出。输入数据来自某供电公司近几年对各种型号电缆所做的振荡波试验存储的数据；随机变量选取电缆的局部放电和介电损耗参数。分布函数在本文中选取对

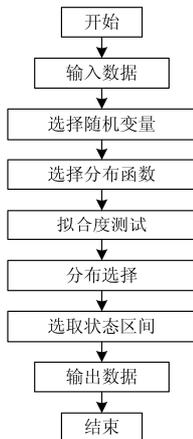


图 1 研究路线

Fig.1 Research route

数正态分布和 Weibull 分布函数来进行对比研究。使用两种分布函数对试验检测数据分别进行拟合测试，通过计算拟合优度来判定哪种分布函数更适合进行老化参数的分析和预测。下一步是设置电缆各种状态下的边界条件，建立起电缆状态的模型，最后对分布函数计算出的老化参数进行考评来检验电缆的运行状态是否良好<sup>[7-9]</sup>。

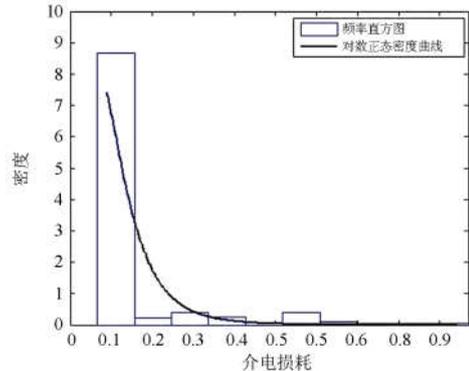
### 3 两种分布函数的拟合测试分析

先使用对数正态分布和 Weibull 分布来对振荡波试验得到的介电损耗试验数据进行拟合测试，并对拟合测试的结果进行分析。选取  $U_0(8.7 \text{ kV})$  和  $1.7U_0(15.9 \text{ kV})$  两种电压等级下的振荡波试验数据。

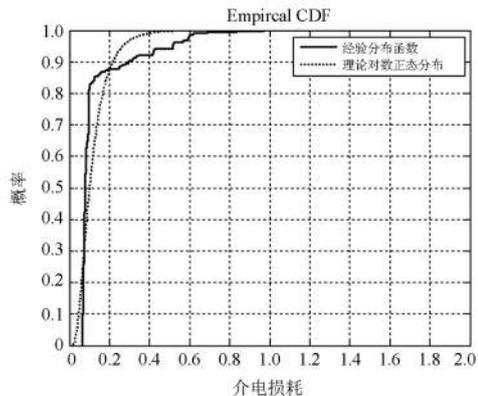
#### 3.1 介电损耗拟合

图 2 和图 3 分别为 8.7 kV 电压等级时使用对数正态分布函数和 Weibull 分布函数对电缆介电损耗已有的数据进行拟合后得到的结果。其中图 2(a)是有关于介电损耗的频率分布直方图和对数正态分布的概率密度曲线，图 2(b)为经验分布函数和理论对数正态分布的对比关系图。

##### 1) 对数正态分布拟合



(a)  $\tan \delta$  时介损的密度分布



(b)  $\tan \delta$  时介损概率分布

图 2 使用对数正态分布函数对介电损耗数据拟合后的对比曲线(8.7 kV 时)

Fig. 2 Fitted contrast curves of dielectric loss data obtained by using lognormal distribution function (8.7 kV)

2) Weibull 分布拟合

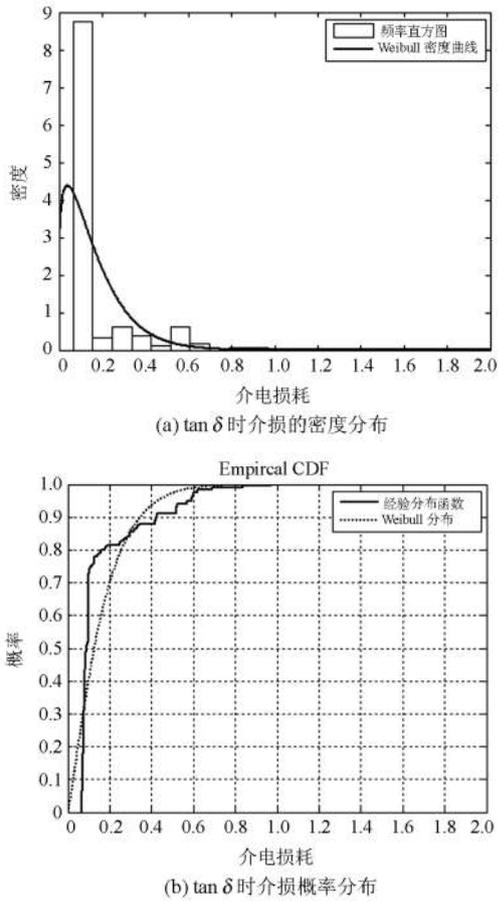


图 3 使用 Weibull 分布函数对介电损耗数据拟合后的对比曲线(8.7 kV 时)

Fig. 3 Fitted contrast curves of dielectric loss data using Weibull distribution function (8.7 kV)

这里借助于统计学中的决定系数  $R$  来判定来计算两种分布函数对实际试验数据的拟合程度, 又通常使用可决系数来进行度量决定系数。可决系数介于 0 到 1 之间, 越接近 1 代表该种分布函数对实际数据的拟合的程度越高<sup>[10-11]</sup>。相反, 可决系数值越小, 则表示该种分布函数对实际数据的拟合的程度越不好。可决系数的计算公式为

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST}$$

式中:  $SST$  表示总平方和;  $SSR$  表示回归平方和;  $SSE$  表示残差平方和。

本文借助于 Matlab 数值计算软件对对数正态分布和 Weibull 分布与实际数据之间的决定系数进行计算, 得出对数正态分布对实际数据的决定系数  $R$  为 0.952; Weibull 分布对实际数据的决定系数  $R$  为 0.927, 因此可以得出, 对数正态分布函数能够更

好地对实际数据的拟合。

使用同样的方法得出 15.9 kV 电压等级时的分布函数也选择对数正态分布。图 4 是 15.9 kV 时使用对数正态分布对实际数据进行拟合后的分布图。

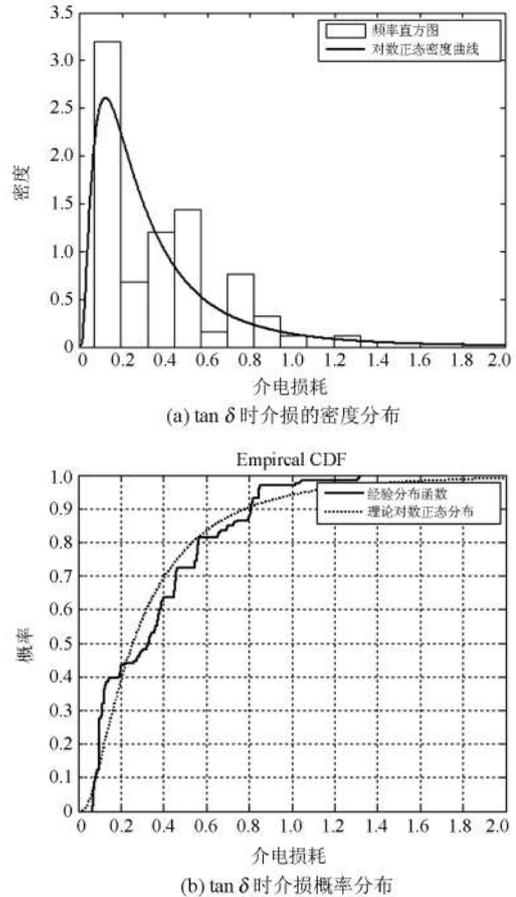


图 4 使用对数正态分布函数对介电损耗数据拟合后的对比曲线(15.9 kV 时)

Fig. 4 Fitted contrast curves of dielectric loss data obtained by using lognormal distribution function (15.9 kV)

3.2 局部放电数据拟合

使用 3.1 节中的方法对电缆局部放电试验数据进行拟合和相应的决定系数的计算, 经过计算同样选取对数正态分布作为电缆局部放电数据进行拟合的分布函数。图 5 和图 6 分别为 8.7 kV 和 15.9 kV 电压等级时对数正态分布对电缆局部放电实际数据所进行拟合后得到的结果。其中图 5(a)和图 6(a)是有关于局部放电的频率分布直方图和对数正态分布的概率密度曲线, 图 5(b)和图 6(b)经验分布函数和理论对数正态分布的对比关系图<sup>[12-15]</sup>。

4 电缆状态评估模型

对电缆的状态进行划分成三个层次的状态: 正

常、隐患、故障。所谓正常就是指电缆的运行状态良好，老化程度较小，对电缆的影响很小；隐患是指电缆仍然可以正常运行，但是已经有了较为明显的老化现象，如果继续工作下去有可能产生严重的问题；故障是指电缆已经发生非常明显的老化，随时有可能发生问题，需要及时地修补或进行替换。通过指定电缆的这三种状态为下一步判断电缆的状态评估提供依据。

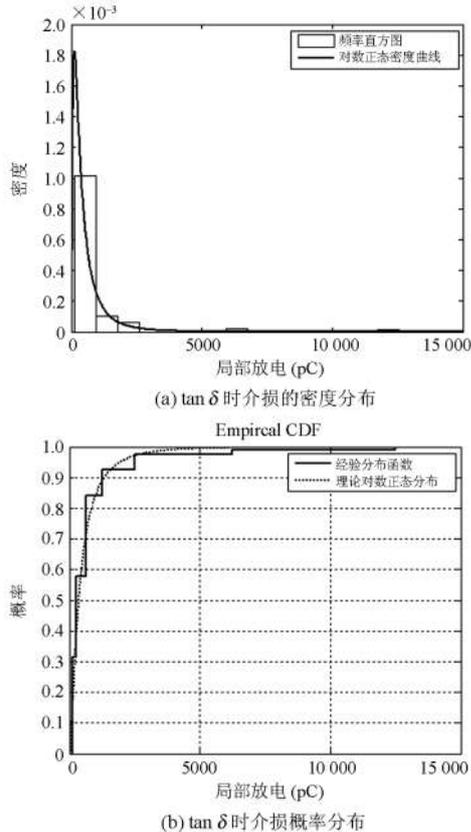


图 5 使用对数正态分布函数对局部放电数据拟合后的对比曲线(8.7 kV 时)

Fig. 5 Fitting curves of partial discharge data obtained using log normal distribution function (8.7 kV)

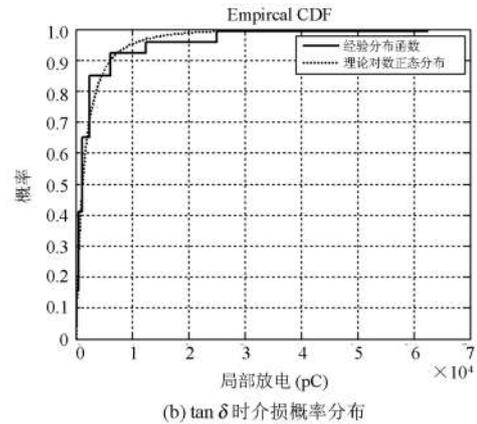
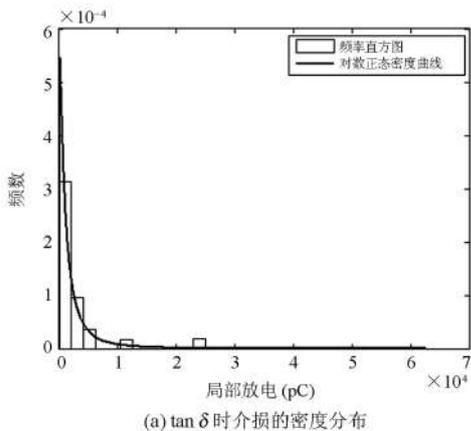


图 6 使用对数正态分布函数对局部放电数据拟合后的对比曲线(15.9 kV 时)

Fig. 6 Fitting curves of partial discharge data obtained using log normal distribution function (15.9 kV)

通过对近几年对各种类型电缆进行检测积累起来的数据进行分析后发现，很大部分新电缆或者工作时间较短的电缆所进行的介电损耗的数值都分布在小于 0.38 的区域，而使用时间较长的老化程度较大的电缆试验所得到的介电损耗的数值则很大部分分布在大于 0.85 的区域内。在对各种状态下的电缆所进行的局部放电检测数据进行分析后也得出同样的结论。所以这次设定电缆的状态时以 0.38 和 0.85 为两个边界值，小于 0.38 表示电缆处于正常的状态。在 0.38 和 0.85 之间时表示电缆存在一定的老化以及潜在的隐患；大于 0.85 时表示电缆的老化较为严重，应及时修补或替换。图 7 为电缆各个状态划分的区间图，红色虚线表示两个边界分位点。表 1 和表 2 分别表示 8.7 kV 与 15.9 kV 时电缆的局放和介损数值计算后的边界值。

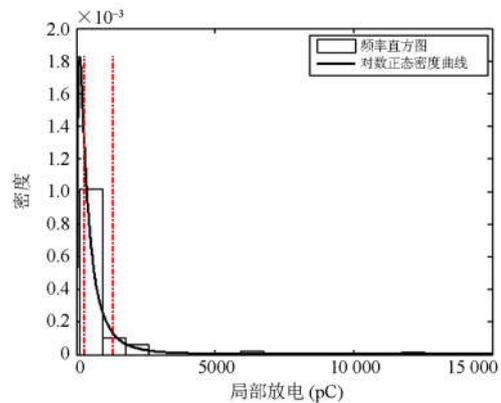


图 7 8.7 kV 电缆局部放电对应的状态区间划分

Fig. 7 State interval division of partial discharge of 8.7 kV cable

表 1 8.7 kV 与 15.9 kV 时电缆局部放电的边界数值  
Table 1 Boundary values of partial discharge of cables  
at 8.7 kV and 15.9 kV

	PD (8.7 kV)		PD (15.9 kV)	
	边界	0.35	0.85	0.35
节点	129pC	379pC	409pC	1315pC
绝缘	281pC	1342pC	897pC	5824pC

表 2 8.7 kV 与 15.9 kV 时电缆介损的边界数值  
Table 2 Boundary values for dielectric loss of cables  
in 8.7 kV and 15.9 kV

	PD (8.7 kV)		PD (15.9 kV)	
	边界	0.35	0.85	0.35
介损	0.0986	0.2788	0.1349	0.5765

当对某一条线路电缆的状态进行评估时, 先需要采集电缆处于 8.7 kV 与 15.9 kV 两种电压水平下产生的局放数值和介损数值。然后对两部分数值和相应电压级别时的边界数值对比, 由此能够确定出此时电缆所处的状态。可以通过定期地对相应电缆进行测试, 然后对测试数值进行分析得出电缆状态的变化趋势。结合电缆状态模型对电缆一段时期内的状态进行预测, 从而能够做出相应的检测和维修计划, 对电缆进行有效的管理。

## 5 实验

为了对某供电公司的某一线路所使用的 10 kV 电缆的状态是否良好来进行评估。经过对一定时期内对该电缆间断的进行了振荡波试验检测, 总共进行了 12 次的试验。试验结果见表 3 所示。表 4 为根据表 3 和参考电缆状态的边界条件得出的电缆每次测量所处的状态。

表 3 10 kV 电缆测试结果  
Table 3 Test results for 10 kV cable

次数	$U_0(8.7 \text{ kV})$		$1.7U_0(15.9 \text{ kV})$	
	$\tan \delta$	PD(pC)	$\tan \delta$	PD(pC)
1	0.046	233	0.129	589
2	0.068	189	0.106	623
3	0.067	203	0.098	719
4	0.079	79	0.126	913
5	0.048	81	0.111	801
6	0.062	174	0.109	831
7	0.058	211	0.105	484
8	0.099	273	0.114	698
9	0.083	138	0.122	909
10	0.037	212	0.087	797

表 4 10 kV 电缆状态情况  
Table 4 Status of 10 kV cable

次数	$U_0(8.7 \text{ kV})$		$1.7U_0(15.9 \text{ kV})$	
	Tan $\delta$	PD(pC)	Tan $\delta$	PD(pC)
1	正常	正常	正常	正常
2	正常	正常	正常	正常
3	正常	正常	正常	正常
4	正常	正常	正常	正常
5	正常	正常	正常	正常
6	正常	正常	正常	正常
7	正常	正常	正常	正常
8	隐患	正常	正常	正常
9	正常	正常	正常	隐患
10	正常	正常	正常	正常

由表 4 中可以得出该电缆在这段时期内的运行状态总体上来说没有出现老化的情况, 里面出现的个别处于隐患的情况, 但数值也接近于正常状态的边界数值, 或许是因为试验检测时外部环境条件的作用而产生的误差。

## 6 结论

本文针对电缆在长时间的使用后的状态是否良好, 选择了对数正态分布和 Weibull 分布两种分布常用来进行电缆状态的评估, 本文先假定电缆的接电损耗与局部放电数据符合两种分布, 借助于 Matlab 数值模拟软件对供电公司在近几年里通过振荡波试验检测积累的老化数据进行拟合。并对两种拟合结果进行对比分析, 结果证明对数正态分布更符合电缆的老化参数的分布。设定了电缆状态的三个级别, 建立状态评估模型, 并使用该模型完成对某供电公司 10 kV 电缆的状态评估, 验证了该模型可以对电缆的状态能够有一个正确的评估。研究成果有助于及时了解电缆在运行过程中的状态变化, 并可以根据电缆所处状态的发展趋势制定出相应的检修计划, 可以提高检修效率和减少电缆故障带来的经济损失。

## 参考文献

- [1] GILL Y. Development of an electrical cable replacement simulation model to aid with the management of aging underground electrical cables[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2011, 27(1): 31-37.
  - [2] 姚海燕, 张静, 留毅, 等. 基于多尺度小波判据和时频特征关联的电缆早期故障检测和识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 115-123.
- YAO Haiyan, ZHANG Jing, LIU Yi, et al. Method of cable incipient faults detection and identification based

on multi-scale wavelet criterions and time-frequency feature association[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 115-123.

[3] 顾梦元. 威布尔分布与正态分布两种条件概率密度曲面比较研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2014.  
GU Mengyuan. A comparative study of Weibull conditional probability density distribution surface and normal conditional probability density distribution surface[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2014.

[4] ETEMADI A H, FOTUHI-FIRUZABAD M. Design and routine test optimization of modern protection systems with reliability and economic constraints[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(1): 271-278.

[5] 郭思嘉, 赵振东, 张倩宜, 等. 基于 Weibull 函数分布的电力通信网光缆失效率模型[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(17): 92-99.  
GUO Sijia, ZHAO Zhendong, ZHANG Qianyi, et al. Failure rate model for optical fiber cable in electric power communication network based on Weibull distribution function[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45 (17): 92-99.

[6] ZHOU C, MICHCL M, HCPBURN D, et al. Online partial discharge monitoring in MV underground cables[J]. IFT Measurement and Science, 2009, 3(5): 353-363.

[7] 杨建, 唐忠. 高压电缆在线行波故障测距算法的设计[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(14): 48-54.  
YANG Jian, TANG Zhong. Design of online traveling wave based fault location algorithm for HV cable[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(14): 48-54.

[8] 周昊. 10 kV 交联聚乙烯电缆状态评估和状态检修策略研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.  
ZHOU Hao. Study on evaluation and condition based maintenance strategy of 10 kV XLPE cable status[D]. Nanjing: Southeast University, 2015.

[9] 吴敏秀. 中压电缆终端在线监测及故障预警技术的研究[J]. 中国电力, 2014, 47(4): 123-127.  
WU Minxiu. Study on the on-line monitoring and fault early-warning techniques for medium voltage cable terminals[J]. Electric Power, 2014, 47(4): 123-127.

[10] 王洪新, 程树康, 文习山, 等. XLPE 老化过程中交流绝缘参数特性[J]. 高电压技术, 2005, 31(3): 7-9.  
WANG Hongxin, CHENG Shukang, WEN Xishan, et al. AC insulation characteristics of XLPE in the course of aging[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(3): 7-9.

[11] PETZOLD F, GULSKI E, SEITZ P P, et al. Advanced solution for on-site diagnosis of distribution power cables[C] // 2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, 2008: 1145-1149.

[12] 毛骏. 10 kV 电缆突发故障检测方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(7): 81-86.  
MAO Jun. Research on detection methods for burst faults on 10 kV cable[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(7): 81-86.

[13] 黄肖为. 110 kV 交联聚乙烯电缆绝缘品质评价的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.  
HUANG Xiaowei. Study on the insulation quality evaluation of 110 kV cross-linked polyethylene cable[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.

[14] 杜伯学, 马宗乐, 霍振星, 等. 电力电缆技术的发展与研究动向[J]. 高压电器, 2010, 46(7): 100-104.  
DU Boxue, MA Zongle, HUO Zhenxing, et al. Recent research status of techniques for power cables[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(7): 100-104.

[15] 李建南, 张慧媛, 王鲜花, 等. 中压电缆网接地故障的电弧建模及仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(24): 105-109.  
LI Jiannan, ZHANG Huiyuan, WANG Xianhua, et al. Arc modeling and simulation of the ground faults of the middle voltage cable network[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44 (24): 105-109.

收稿日期: 2017-10-22; 修回日期: 2017-12-15

作者简介:

洪祎祺(1985—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为电缆运行维护。E-mail: 569715261@qq.com

(编辑 张爱琴)