

基于加速性能退化数据的XLPE绝缘可靠性评估

陈新岗^{1,2}, 杨平¹, 马志鹏³, 陈姝婷¹, 罗浩¹, 刘新宇¹

(1. 重庆理工大学 电气与电子工程学院, 重庆 400054; 2. 重庆市能源互联网工程技术研究中心, 重庆 400054; 3. 重庆大学 电气工程学院, 重庆 400044)

摘要:传统的基于失效寿命数据的固体电介质绝缘可靠性评估方法, 试验时间长、失效数据少且难以获取。针对这一问题, 本文研究了基于加速性能退化试验数据的可靠性评估方法。首先, 采用平均电荷密度作为性能退化特征量, 分别在140、160、180 kV/mm场强条件下进行加速性能退化试验, 获取性能退化数据。其次, 计算得出各场强条件下交联聚乙烯(XLPE)绝缘材料的伪失效寿命并确定其统计分布。最后, 结合虚拟增广理论对伪失效寿命数据进行扩充, 利用统计分析方法对扩充后的数据进行分析。结果表明: 采用加速性能退化试验方法进行XLPE绝缘可靠性评估, 经理论计算得到样本可靠度、失效分布密度函数、平均寿命等性能可靠性指标。结合加速寿命模型理论推导出20 kV/mm稳定场强条件下该XLPE绝缘材料的预期寿命为15.3年, 且到达预期寿命时可靠度为0.445 1。

关键词: XLPE; 加速性能退化; 虚拟增广; 可靠性评估; 退化轨迹

中图分类号: TM215; TM855 文献标志码: A 文章编号: 1009-9239(2021)07-0095-07

DOI: 10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2021.07.014

XLPE Insulation Reliability Assessment Based on Accelerated Performance Degradation Data

CHEN Xingang^{1,2}, YANG Ping¹, MA Zhipeng³, CHEN Shuting¹, LUO Hao¹, LIU Xinyu¹

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China; 2. Chongqing Engineering Research Center of Energy Internet, Chongqing 400054, China; 3. School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The traditional insulation reliability evaluation method based on failure life data for solid dielectric need long test time, and the failure data is little and difficult to obtain. In view of this issue, a reliability assessment method based on the test data of accelerated performance degradation was studied in this paper. Firstly, the average charge density was used as the characteristic parameter of performance degradation, and accelerated performance degradation tests were conducted to obtain performance degradation data under 140 kV/mm, 160 kV/mm, and 180 kV/mm of field strength, respectively. Secondly, the pseudo-failure life of XLPE insulation material under different field strengths was calculated, and its statistical distribution was determined. Finally, the pseudo-failure life data was expanded in combination with the virtual augmentation theory, and the expanded data was analyzed by statistical analysis methods. The results show that the performance reliability indicators such as sample reliability, failure distribution density function, and average life can be obtained through using accelerated performance degradation test method to assess the reliability of XLPE insulation. In combination with the accelerated life model theory, the life expectancy of the XLPE insulating material is 15.3 years under 20 kV/mm of stable field strength, and the reliability when reaching the expected life is 0.445 1.

Key words: XLPE; accelerated performance degradation; virtual augmentation; reliability assessment; degradation trajectory

收稿日期: 2020-08-11 修回日期: 2020-09-08

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB0900701)

作者简介: 陈新岗(1968-), 男(汉族), 重庆人, 教授, 主要从事电气设备状态监测、智能发电运行与控制、信号采集与信号处理的研究; 通信作者: 杨平(1994-), 男(汉族), 四川资阳人, 硕士生, 主要从事高电压与绝缘技术的研究。

0 引言

绝缘材料的性能决定着电力电缆是否能正常运行, 交联聚乙烯(cross-linked polyethylene, XLPE)绝缘材料具有良好的耐热性、较高的绝缘电阻和耐压强度, 电气性能优良。对XLPE绝缘材料进行老化评估有助于预测电缆更换的时间, 节省电缆维护成本。电、热等应力会加速XLPE的寿命失效, 加速寿命试验是研究其失效原理、评估失效寿命的有效方式, 但随着绝缘技术、生产工艺的提升, XLPE电缆绝缘材料这类长寿命产品在传统的加速寿命试验中容易表现出零失效或者极小概率失效的情况, 从而导致试验时间加长、试验经费增加等问题, 使得在可靠性试验方法的发展上有了一定的局限性。因此, 有必要开展基于加速性能退化数据的可靠性评估方法研究。

传统的加速寿命试验需要记录大量失效数据, 而针对XLPE绝缘材料这类长寿命、高成本产品要做到大样本、长时间试验并不现实, 而加速性能退化试验能有效解决这类问题^[1]。原理是在强应力下表征性能退化的特征量累积达到某一阈值就会导致产品失效, 在不同时刻性能特征量退化数据基础上进行分析处理, 利用统计分析手段对其可靠性进行评估。

对于加速性能退化数据可靠性评估问题, 国内外已经做了大量的研究工作。文献[2]结合Monte Carlo法对性能退化数据进行分析处理并推断出产品的伪失效寿命; 文献[3]则对性能退化轨迹的建立提出了方法及流程; 文献[4]就性能退化轨迹和性能退化量分布分别进行了可靠性评估方法研究, 并利用加速性能退化数据对碳膜电阻器的可靠性进行了评估; 文献[5]利用函数模型对某电子产品加速退化轨迹进行了拟合; 文献[6]利用一种极大似然分析方法对性能退化数据进行了处理; 文献[7]对产品性能退化轨迹模型进行估计并推导出产品的寿命; 文献[8]对性能退化数据的应用和可靠性建模进行了深入研究; 文献[9]利用加速退化试验数据对给定失效阈值的产品进行退化轨迹建模, 并对其可靠性进行了评估。

本文首先介绍性能退化的概念与基于加速性能退化数据可靠性评估的优势, 随后基于伪失效寿命分布法分析性能退化试验获取的XLPE绝缘材料性能退化数据, 利用文中所提及方法对该XLPE绝缘材料可靠性进行评估, 并推导出电力电缆稳定运

行场强条件下该绝缘材料的预期寿命。

1 模型的建立与分析

1.1 性能退化数学统计模型

在1993年LU C J等^[2]就提出了基于性能退化数据分析的通用数学模型, 如式(1)所示。

$$D_{ij} = T(t_{ij}, \Phi(\gamma_i, \varphi_{ij})) + \zeta_{ij} \quad (1)$$

式(1)中: D_{ij} 是第 i 组试验样本在测试 t_{ij} 时刻表现出的表征性能退化的特征量测试值; $T(t_{ij}, \Phi(\gamma_i, \varphi_{ij}))$ 为实际退化量值, γ_i 、 φ_{ij} 为相应参数; ζ_{ij} 是与 $T(t_{ij}, \Phi(\gamma_i, \varphi_{ij}))$ 相互独立且服从正态分布的测量误差。一般地, 以式(1)中的 $D_{ij} = T(t_{ij}, \Phi(\gamma_i, \varphi_{ij}))$ 为性能退化轨迹模型。

加速性能退化试验是对性能退化过程的规律性进行量化, 其机理性、退化规律、分布模型与性能退化试验数据分析相同。性能退化模型的试验样本很难通过物理失效分析方法得到, 一般情况下需要结合现有的数学模型和优化分析手段通过拟合、优化得到所需的退化轨迹模型。

对于绝大多数具有性能退化特点的试验样本, 其退化轨迹可用式(2)~(5) 4类数学模型进行有效拟合^[10]。

$$\text{线性退化模型: } D(t) = \theta \cdot t + \psi \quad (2)$$

$$\text{幂函数模型: } D(t) = \psi \cdot t^\theta \quad (3)$$

$$\text{对数函数模型: } D(t) = \theta \cdot \ln t + \psi \quad (4)$$

$$\text{指数函数模型: } D(t) = \psi \cdot e^{\theta \cdot t} \quad (5)$$

式(2)~(5)中: $D(t)$ 为试验样本退化试验特征量在 t 时刻的性能退化检测值; θ 与 ψ 为未知参数, 可以通过试验数据拟合求得。

性能退化轨迹模型的建立主要包括拟合模型的选择、拟合优度的评价以及模型参数的估计。本研究利用平方误差和(sum of squared error, SSE)对拟合模型的拟合优度进行评估, 其数学表达式如式(6)所示。

$$SSE = \sum_{i=1}^n (D_{ij} - \bar{D})^2 \quad (6)$$

式(6)中: SSE为平方误差和, 即试验误差大小的偏差平方和, 反映测量数据点与拟合函数之间的偏差总量, 其值的大小表示拟合效果的优劣; D_{ij} 是 j 时刻第 i 组样本性能退化量的检测值; \bar{D} 是其拟合函数对应值。

1.2 伪失效寿命分布法

在前文确定的轨迹模型中求取其伪失效寿命

值,再根据伪失效分布法检验其分布的合理性。伪失效分布法通过建立试验样本加速退化特征量数据与时间的函数关系,利用加速退化轨迹模型表示样品伪失效寿命值与施加应力之间的关系^[11]。具体步骤如下:

(1)对试验样本进行加速退化试验,并记录退化数据,根据试验要求制定加速退化失效阈值。然后利用已知性能退化轨迹数学模型对记录数据进行非线性最小二乘法拟合^[12],评价出最优拟合度数学模型并求解模型参数。

(2)结合失效阈值,获取伪失效寿命数据并对其分布假设性检验。一般对于电力设备,特别是XLPE绝缘材料而言,其寿命分布通常符合Weibull分布、正态分布或者对数正态分布^[13]。

(3)结合虚拟增广理论确定样本寿命分布,对XLPE绝缘材料寿命进行可靠性评估。

1.3 虚拟增广样本数据方法

在对成本昂贵、寿命较长的产品进行老化试验时往往很难得到大样本失效数据,而利用小样本数据虚拟增广方法对样本数据进行扩充能很好地解决样本数据不足的缺点^[14]。设 n 为增广后的样本数据检测量, \bar{A} 为增广前试验样本数据量的均值。虚拟增广样本数据前后均值 \bar{A} 应保持相等,且增广后试验样本数据的标准差 ω 与增广之后类似样本的标准差相等^[15],即满足式(7)。

$$\begin{cases} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i = \bar{A} \\ \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\bar{A} - A_i)^2 = \omega^2 \end{cases} \quad (7)$$

为使增广后数据更为合理,建议用式(8)所示增广公式对原始数据进行增广。

$$A_i = \bar{A} \pm (\alpha_1 \times (i-1)^{\alpha_2} + \lambda)^{\omega}; i = 1, \dots, n/2 \quad (8)$$

式(8)中: α_1 与 α_2 为控制系数(根据经验自行设定); λ 为待定系数; n 为需要增广的样本数据量。

1.4 加速老化模型的建立

在加速试验过程中,性能退化试验和寿命试验失效原理相同。加速性能退化试验是在加速寿命试验基础上,选取材料某种性能(如表征空间电荷积聚特性的平均电荷密度)作为变量,获取试验过程中的特征量退化数据。由于加速性能退化数据分析获得的寿命为伪失效数据,但其失效机理符合加速寿命试验,可以使用加速寿命模型分析方法对性能退化数据分析进行推广^[16],具体模型如式(9)

所示。

$$\ln L = a + b\Phi(s) \quad (9)$$

式(9)中: L 为特征寿命; $\Phi(s)$ 为应力水平; a 、 b 为性能参数,可由高斯-马尔可夫定理求取其最佳线性无偏估计值。

2 加速性能退化数据的统计分析

2.1 空间电荷效应对XLPE绝缘老化的影响

电力设备特别是XLPE电缆,由于微孔、气隙等影响,在电场的作用下,不同老化程度的绝缘材料内部电子被绝缘层内的陷阱捕获,导致电荷在绝缘层内积聚而形成空间电荷^[17]。

平均电荷密度的变化特性能有效反映交联聚乙烯的老化程度^[18],可利用平均电荷密度的变化量作为电缆绝缘材料性能退化特征量对其寿命进行评估分析。平均电荷密度可以根据式(10)获取。

$$q(t) = \frac{1}{x_1 - x_0} \int_{x_0}^{x_1} |\rho(x,t)| dx \quad (10)$$

式(10)中: $q(t)$ 为某时刻空间电荷平均电荷密度; x_0 与 x_1 为电极位置; $\rho(x,t)$ 是 t 时刻样本厚度方向上位置 x 处的空间电荷密度。

2.2 试验设计及伪失效寿命数据获取

采用电声脉冲(pulsed electro-acoustic, PEA)法对试验样本的空间电荷进行测试,具体试验装置如图1所示,在试验中选取电场强度作为加速试验条件,结合恒定应力试验方法对交联聚乙烯材料压片进行性能退化试验^[19]。

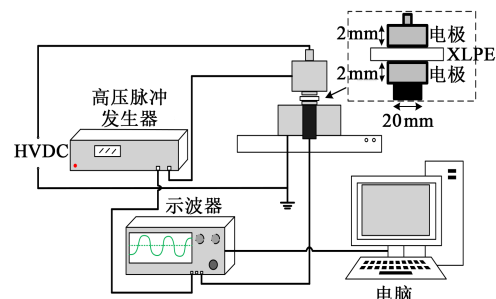


图1 PEA空间电荷测试装置

Fig.1 PEA space charge testing device

首先,选取长宽均为2 cm、厚度为0.06 mm、型号为LS4258DCE的XLPE绝缘材料压片,经缺陷挑选选择27片,将其分为A、B、C 3组,每组各9片,经干燥、脱气处理后分别在140、160、180 kV/mm场强条件下进行PEA试验。图2为不同场强条件下空间

电荷密度分布图。

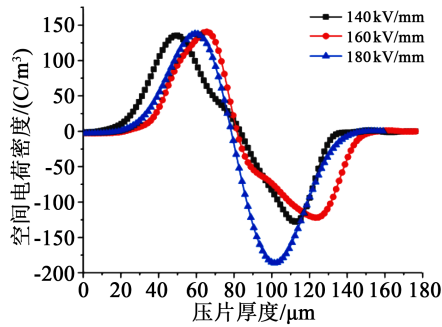


图2 某时刻不同场强条件下空间电荷密度分布

Fig.2 Space charge density distribution under different field intensity conditions at a certain time

其次,重复完成各组压片试验,分别记录各场强条件下的PEA测试数据。因为设备、人为等因素可能会造成试验误差较大,所以试验结束后选择剔除掉误差较大的试验组数据。

最后,结合式(10)计算各组平均电荷密度值,选择各组数据的平均值作为当前试验组测试值并截取期间某一段间隔时刻试验数据进行分析处理。数据分布如图3所示,部分数据如表1所示。

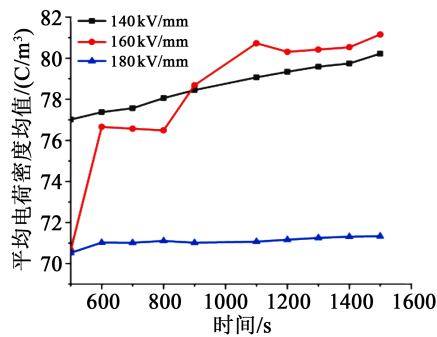


图3 不同场强条件下平均电荷密度均值分布

Fig.3 Mean value distribution of average charge density under different field intensity

图4为不同场强条件下各平均电荷密度的拟合结果。不同老化程度、不同生产工艺的XLPE绝缘材料,其内部空间电荷分布特性会有不同,无法准确确定其失效阈值。因此本试验采用同一批次、老化程度相近的XLPE绝缘材料压片进行加速性能退化试验。

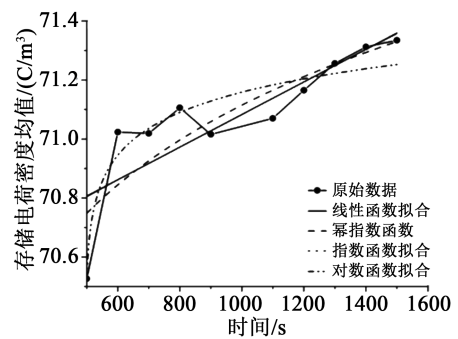
根据交联聚乙烯交联程度,综合考虑样本厚度与其杂质质量分数情况,其阈值选用加速退化试验中首先达到本批次样本失效寿命时其内部平均电荷密度的Weibull统计结果值(115.62 C/m³)作为伪

表1 部分不同场强条件下XLPE绝缘材料加速退化试验性能退化数据均值

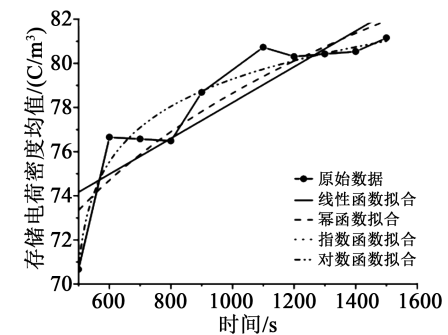
Tab.1 Part mean values of performance degradation data of XLPE insulation materials under different field intensity conditions

时间/s	平均电荷密度/(C·m ⁻³)		
	140 kV/mm	160 kV/mm	180 kV/mm
500	70.527	70.661	77.014
600	71.023	76.654	77.373
700	71.019	76.569	77.568
800	71.106	76.485	78.060
900	71.016	78.683	78.446
1 100	71.070	80.726	79.064
1 200	71.165	80.308	79.341
1 300	71.256	80.420	79.586
1 400	71.312	80.531	79.747
1 500	71.335	81.155	80.222

失效寿命失效阈值^[20],再结合不同拟合模型(如表2所示)分别计算出140、160、180 kV/mm场强条件下样本的伪失效寿命分别为107 914.3、106 713.2、12 700.0 s。



(a)140 kV/mm



(b)160 kV/mm

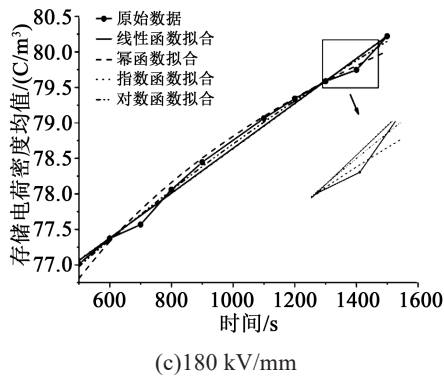


图4 各场强条件下平均电荷密度均值拟合曲线
Fig.4 Mean value fitting curve of average charge density under each field intensity

表2 各拟合模型曲线函数及参数估计

Tab.2 Curve functions and parameter estimates of each fitting model

拟合函数	140 kV/mm			160 kV/mm			180 kV/mm		
	SSE	θ	ψ	SSE	θ	ψ	SSE	θ	ψ
幂函数	0.115 4	7.455×10^{-3}	67.55	15.582 7	8.110×10^{-3}	70.11	0.150	3.720×10^{-2}	60.94
对数函数	0.115 2	0.530	67.45	14.884 5	7.906	24.9	0.162	2.917	58.67
指数函数	0.139 3	7.77×10^{-6}	70.53	23.404	1.026×10^{-4}	70.55	0.082	4.110×10^{-2}	75.54
线性函数	0.139 1	5.526×10^{-4}	70.53	22.609 9	8.111×10^{-3}	70.11	0.076	3.160×10^{-3}	75.48

表3 虚拟增广之后伪失效寿命数据

Tab.3 Pseudo-failure life data after virtual augmentation

A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13	A14	A15
0.06	0.12	0.18	0.24	0.36	0.60	0.96	1.00	1.06	1.12	1.18	1.24	1.36	1.60	1.85

表4中, H 的数值表示是否接受假设, 1为拒绝, 0则为接受; P 为服从假设分布的概率值, K 、 C 为观测值。

根据假设检验结果可知, 该失效寿命数据均服从表4中的3种概率密度分布, 其中服从Weibull分布的概率最高, 因此本研究选择Weibull分布作为该XLPE绝缘材料试验样本失效寿命数据分布是合理的。

3.2 可靠性评估

依据Weibull分布试验数据可靠性分析方法, 结合加速寿命模型的分析, 对分布拟合后的非线性曲线进行时间尺度变换, 再结合求极值分布参数的最佳线性无偏估计法分别对其极值参数进行求解^[22], 对增广寿命数据进行加速寿命模型推广, 结果如式(11)所示。

3 XLPE绝缘可靠性评估

3.1 伪失效寿命虚拟增广样本分布选取

利用虚拟增广数据容量的方法将寿命数据推广到 $n=15$, 结合1.3节理论依据将所得伪失效寿命数据均值设定为 \bar{a} , 增广数据标准差 ω 为已知。增广后的数据如表3所示。

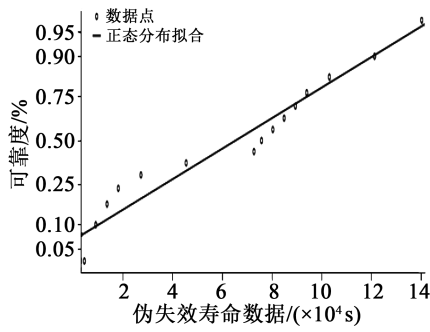
得到样本伪失效数据后需要对其进行分布检验。失效数据分布包括正态分布、Weibull分布、对数正态分布等常用分布^[21]。分别对所得伪失效寿命数据进行分布检验, 如图5所示。在各分布假设图中, 越接近直线则表示该假设分布越接近可行分布。结合MATLAB软件工具对各分布进行Kolmogorov-Smirnov(K-S)检验, 结果如表4所示。

$$\begin{cases} \hat{\mu} = \sum_{i=1}^7 D(n, r, j) \ln t_{ij} = 20.08 \\ \hat{\delta} = \sum_{i=1}^7 C(n, r, j) \ln t_{ij} = 2.35 \end{cases} \quad (11)$$

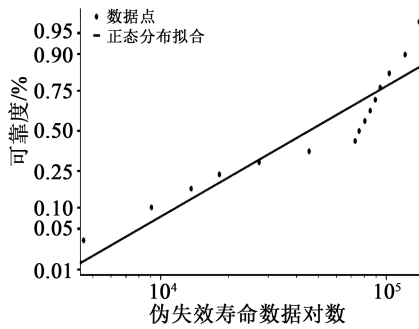
式(11)中: $D(r, n, j)$ 是最优线性不变估计系数; $C(r, n, j)$ 是最优线性无偏估计系数, 可查表获得^[23]。求得Weibull分布尺度与形状参数的点估计 $\hat{\eta} = \exp(\hat{\mu})$ 和 $\hat{m} = g_{r,n} \cdot \hat{\delta}^{-1}$, 其中 $g_{r,n}$ 是样本对应估计 \hat{m} 的偏修系数。

根据服从Weibull分布的XLPE绝缘材料性能退化数据分析, 可以对其试验样本的可靠度 $R(t)$ 、失效概率密度函数 $f(t)$ 、平均寿命时间 $L(t)$ 等性能指标进行求解, 具体求解方法如式(11)所示。

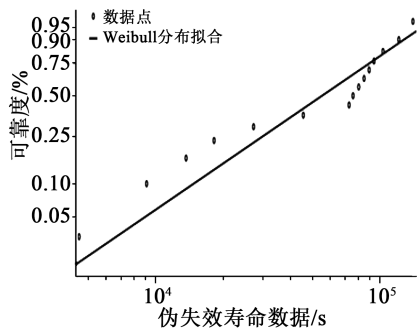
由于本研究选用Weibull分布作为XLPE绝缘材料失效寿命数据分布, 存在式(12)所示关系。



(a)正态分布假设概率图



(b)对数正态分布假设概率图



(c)Weibull分布假设概率图

图5 各个分布假设概率图

Fig.5 Hypothetical probability plots for each distribution

表4 各分布假设检验结果

Tab.4 Test results of each distribution hypothesis

	H	P	K	C
Weibull分布	0	0.966 7	0.096 3	0.412 5
正态分布	0	0.932 3	0.113 6	0.412 5
对数正态分布	0	0.931 0	0.108 5	0.412 5

$$R(t) = \exp(-(\hat{\eta} \cdot t^{-1})^{\hat{m}}) = \exp(-71277.1 \times t^{-1.42795}) \quad (12)$$

式(12)中： $R(t)$ 为试验样本可靠度，其函数曲线如图6所示。

失效概率密度函数如式(13)所示，该函数曲线如图7所示。

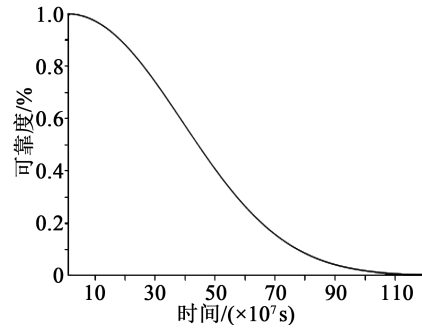


图6 XLPE绝缘材料可靠度曲线

Fig.6 The reliability curve of XLPE insulation material

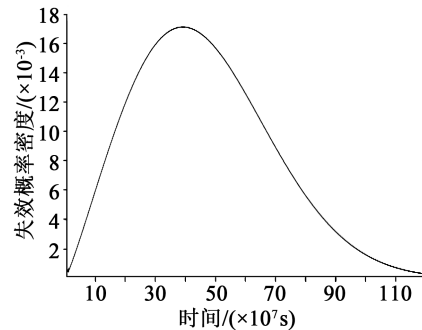


图7 电缆绝缘材料失效概率密度函数曲线

Fig.7 Failure probability density function curve of cable insulation material

$$f(t) = \frac{\hat{m}}{\hat{\eta}} \left(\frac{t}{\hat{\eta}}\right)^{\hat{m}-1} \exp\left(-\left(\frac{t}{\hat{\eta}}\right)^{\hat{m}}\right) = \frac{1.42795}{71277.1} \times \left(\frac{t}{71277.1}\right)^{0.42795} \cdot \exp\left(-\left(\frac{t}{71277.1}\right)^{1.42795}\right) \quad (13)$$

由图7可以看出，加速性能退化试验初期，XLPE绝缘材料由于气隙、微孔等原因，在场强作用下，绝缘内部空间电荷迅速注入、积聚导致电树枝的形成^[24]，且电树枝呈扇状随场强畸变程度向外扩散，故性能下降较快。然而一段时间后，电树枝扩散达到滞长阶段，使其扩散减缓，所以性能下降趋势变得平缓^[25]。

预期平均寿命如式(14)所示。

$$L(t) = \exp\left(\frac{GH - IM}{EG - I^2} + \frac{EM - IH}{EG - I^2} \tilde{\Phi}(s)\right) \times \Gamma\left(1 + \frac{1}{\hat{m}}\right) \quad (14)$$

$$= 5.282 \times 10^8 \times 0.911$$

式(14)中： GH 、 IM 、 EM 、 IH 、 EG 、 I^2 函数值可以在文献[23]中查到； $\tilde{\Phi}(s)$ 为20 kV/mm稳定场强条件。计算求得该XLPE绝缘材料在20 kV/mm稳定场强条件下的预期平均寿命为 4.81×10^8 (s)≈15.3年，结合式(12)可以计算出平均寿命的可靠度为 $R=0.445 1$ 。

4 结论

(1)选取平均电荷密度作为性能退化量，利用加速退化试验获取能表征性能退化的特征量数据，

再结合已有的数学经验模型对退化试验数据进行拟合,能有效解决物理失效数据获取较难,且时间较长的缺点。

(2)针对XLPE绝缘材料多样本试验难度大、成本消耗快等问题,本文在利用伪寿命分布方法的加速退化试验基础上,结合虚拟增广理论对试验样本可靠性进行评估,得到其伪失效寿命分别为107 914.3、106 713.2、12 700.0 s。

(3)理论推算得到试验用XLPE绝缘材料样本在稳定场强20 kV/mm条件下运行15.3年达到预期失效寿命,且达到失效寿命时的可靠度为0.445 1,即当该材料达到平均寿命时间时,仍有44.51%处于未失效状态。

参考文献:

- [1] 邓爱民,陈循,张春华,等.基于加速退化数据的可靠性评估[J]. 火箭与制导学报,2006,26(2):808-812,815.
- [2] LU C J, MEEKER W O. Using degradation measures to estimate a time-to-failure distribution[J]. Technometrics,1993,35(2):161-174.
- [3] 柳爱利,寇方勇,寇昆湖.基于伪寿命分布的退化数据可靠性评估方法[J]. 火力与指挥控制,2014,39(8):102-105.
- [4] 邓爱民,陈循,张春华,等.基于性能退化数据的可靠性评估[J]. 宇航学报,2006(3):546-552.
- [5] 马小兵,王晋忠,赵宇.基于伪寿命分布的退化数据可靠性评估方法[J]. 系统工程与电子技术,2011,33(1):228-232.
- [6] HONG Y L, ZHANG M, MEEKER W Q. Big data and reliability applications: The complexity dimension[J]. Journal of Quality Technology,2018,50(2):149-153.
- [7] CHEN Z, ZHENG S. Lifetime distribution based degradation analysis[J]. IEEE Transactions on Reliability,2005,54(1):3-10.
- [8] 赵建印.基于性能退化数据的可靠性建模与应用研究[D].长沙:国防科学技术大学,2005.
- [9] CHO Y H, SEO S K. Design of accelerated degradation test with tightened critical values under random coefficient degradation rate model[J]. Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers,2008,34(1):23-31.
- [10] 张云,于广,王立平,等.基于性能退化数据的数控转台单子样可靠性分析[J]. 清华大学学报(自然科学版),2020,60(4):299-305.
- [11] 王新刚,马瑞敏,黄小凯,等.基于性能退化的失效阈值变化速率对产品可靠性的影响[J]. 航天器环境工程,2020,37(2):137-142.
- [12] 沈庆河,郑晓泉,刘嵘,等.水树枝影响交联聚乙烯电缆绝缘可靠性的试验研究[J]. 绝缘材料,2015,48(2):44-48,52.
- [13] 任子强,司小胜,胡昌华,等.融合多源数据的非线性退化建模与剩余寿命预测[J]. 中国测试,2020,46(2):1-8.
- [14] 陈婧,王泓,乙晓伟,等.虚拟增广S-N曲线样本的投射法[J]. 机械科学与技术,2014,33(3):442-446.
- [15] 黄玮,冯蕴雯,吕震宙.极小子样试验的虚拟增广样本评估方法[J]. 西北工业大学学报,2005,23(3):384-387.
- [16] LEIVA V, RIQUELME M, BALAKRISHNAN N, et al. Lifetime analysis based on the generalized Birnbaum-Saunders distribution[J]. Computational Stats and Data Analysis,2008,52(4):2079-2097.
- [17] MA Z, YANG L, BIAN H, et al. An improved IPM for life estimation of XLPE under DC stress accounting for space-charge effects[J]. IEEE Access,2019:2946521.
- [18] 朱爱荣,曹晓珑.不同交联方式对交联聚乙烯电缆结晶形态影响的研究[J]. 绝缘材料,2005,38(3):38-40.
- [19] MA Z, YANG L, BHUTTA M, et al. Effect of thickness on the space charge behavior and DC breakdown strength of cross-linked polyethylene insulation[J]. IEEE Access,2020(8):85552-85566.
- [20] 王有元,袁园,李剑,等.变压器油纸绝缘可靠性的威布尔混合评估模型[J]. 高电压技术,2010,36(4):842-848.
- [21] 何东欣.交联聚乙烯电缆交流空间电荷与老化特性研究[D].北京:华北电力大学,2017:58-71.
- [22] 张振鹏,张明泽,刘骥,等.振动条件下XLPE绝缘热老化的可靠性评估[J]. 高电压技术,2017,43(11):3726-3731.
- [23] 赵宇.可靠性数据分析[M].北京:国防工业出版社,2011.
- [24] 刘晓东,郑晓泉,屠德民,等.交联工艺对交联聚乙烯中空间电荷的影响[J]. 绝缘材料,2005,38(5):23-27.
- [25] 周凯,黄科荣,黄明,等.交联聚乙烯电缆绝缘中的水树生长特性[J]. 高电压技术,2019,45(10):3207-3213.