

文章编号:1671-251X(2018)08-0057-06

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2018010044

一种矿用电缆剩余寿命预测方法

李磊, 马宪民, 范文玲

(西安科技大学 电气与控制工程学院, 陕西 西安 710054)

摘要:针对现有矿用电缆剩余寿命预测方法建模繁琐、失效数据采集困难、预测精度低等问题,提出了一种基于灰色预测和多尺度量子谐振子优化算法的矿用电缆剩余寿命预测方法。首先采集电缆加速湿热老化试验中不同温度下的介质损耗因数和老化时间;然后采用灰色预测 GM(1,1)模型,以介质损耗因数为 5% 作为电缆寿命终点的判据,根据采集数据建立矿用电缆剩余寿命预测模型;最后采用多尺度量子谐振子优化算法对 GM(1,1)模型参数进行优化,以提高模型的预测精度。试验结果表明,基于灰色预测和多尺度量子谐振子优化算法的矿用电缆剩余寿命预测方法试验时长短,具有较高的准确度。

关键词:矿用电缆; 电缆寿命; 剩余寿命预测; 灰色预测; 多尺度量子谐振子; 介质损耗因数

中图分类号:TD67 文献标志码:A

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20180717.1118.002.html>

A residual life prediction method of mine-used cable

LI Lei, MA Xianmin, FAN Wenling

(School of Electrical and Control Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: For problems of complex modeling, difficult invalid data collection and low prediction precision of existing residual life prediction methods of mine-used cable, a residual life prediction method of mine-used cable was proposed which was based on gray prediction and multi-scale quantum harmonic oscillator algorithm(MQHOA). Dielectric dissipation factors and aging time under different temperature are collected firstly in accelerated hygrothermal aging test. Then residual life prediction model of mine-used cable is established by use of gray prediction GM(1,1) model and the collected data, which takes dielectric dissipation factor of 5% as ending criterion of cable life. Finally, MQHOA is used to optimize parameter of the GM(1,1) model to improve prediction precision. The test result shows that the method has short test time and higher correctness.

Key words: mine-used cable; cable life; residual life prediction; gray prediction; multi-scale quantum harmonic oscillator; dielectric dissipation factor

0 引言

煤矿井下以不间断供电形式保障井下人员安全和机电设备正常运转,承担电力输送任务的矿用电

缆可靠性显得尤为重要。固定段敷设的交联聚乙烯电缆在投入运行后,绝缘会受到电力、机械、温度、湿度等因素的影响产生老化现象,其中以温度、湿度对电缆的影响最为明显。

收稿日期:2018-01-15;修回日期:2018-07-12;责任编辑:李明。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51777167)。

作者简介:李磊(1978—),男,陕西周至人,博士研究生,主要研究方向为矿山供电安全,E-mail:liqieru@163.com。

引用格式:李磊,马宪民,范文玲.一种矿用电缆剩余寿命预测方法[J].工矿自动化,2018,44(8):57-62.

LI Lei, MA Xianmin, FAN Wenling. A residual life prediction method of mine-used cable[J]. Industry and Mine Automation, 2018, 44(8): 57-62.

目前常用的矿用电缆剩余寿命预测方法包括模型法、数理统计法、状态评估法^[1]等。模型法是在矿用电缆受到各种应力的作用下,建立绝缘老化模型,根据实际数据确定模型参数,得到寿命预测公式,进而计算电缆剩余寿命,如电缆的热老化模型是在热应力下,以材料断裂伸长保留率的 50%作为寿命终点的判据,利用实验数据确定 Arrhenius 方程参数,得到寿命预测公式^[2-3]。采用模型法估计电缆剩余寿命时,需要建立各种应力状态下的绝缘老化模型,而矿用电缆在使用过程中会受到多种应力的作用,因此该方法建模过程繁琐。数理统计法假设电缆绝缘老化寿命数据服从可靠性理论中的威布尔分布,采用最小二乘法估计电缆剩余寿命^[4-5]。该方法需要首先积累大量的电缆失效数据才能进行剩余寿命预测,而失效数据采集困难。状态评估法基于在线测量系统,利用电缆老化的敏感参数评估电缆当前的绝缘状态,对于电缆剩余寿命的估计仅能得到一个宽泛的区间,无法得到精确数据,不具有现实指导意义。

文献[6]采用介质损耗因数法估计交联聚乙烯电缆剩余寿命,指出介质的绝缘强度与损耗因数存在关系,并建立了关于介质损耗因数的电缆剩余寿命方程。文献[7]指出介质损耗因数是电缆绝缘品质的重要指标,通过测量介质损耗因数判断电气设备和电缆绝缘状况是一种较灵敏且有效的方法,特别是针对受潮、老化等分布性缺陷。介质损耗因数与电缆绝缘材料密切相关,若其大于 5%,说明电缆已老化或存在故障,应及时维修或更换^[8]。因此,本文以介质损耗因数为 5%作为电缆寿命终点的判据,采用电缆加速湿热老化试验数据建立灰色预测 GM(1,1)模型,对矿用电缆剩余寿命进行预测,并基于多尺度量子谐振子优化算法(Multi-scale Quantum Harmonic Oscillator Algorithm, MQHOA)对该模型参数进行优化,以获得更准确、可靠的电缆寿命预测值。

1 电缆加速湿热老化试验

自然环境老化是评价电缆寿命真实、有效的方法,但老化时间长^[9]。而电缆加速湿热老化试验在保持失效机理不变的情况下,通过加大试验应力来缩短电缆老化时间,提高了试验效率^[10-13]。

本文对 MYJV22 8.7/15 kV 3×50 mm 型矿用三芯交联聚乙烯电缆进行加速湿热老化试验。该电

缆在井下固定敷设情况如图 1 所示。根据 MT 818.11—2009《煤矿用电缆 第 11 部分:额定电压 10 kV 及以下固定敷设电力电缆一般规定》电缆导体的最高额定工作温度为 90 ℃^[14],而交联聚乙烯绝缘材料在高于 150 ℃环境下可能发生晶体大小改变甚至再交联现象^[15]。同时考虑到井下环境潮湿,试验温度最终选择 110,120,130,140 ℃,湿度为 95%RH。电缆加速湿热老化试验结束后,采用 JSY-H 异频抗干扰介质损耗测试仪对电缆介质损耗因数进行测量,取介质损耗因数为 5%作为电缆寿命终点判据^[16-17]。测试仪具有变频功能,考虑到在工频上直接测量会受严重干扰,因此在 45,55 Hz 频率下测量电缆介质损耗因数,将 2 个测量值的均值作为工频下的电缆介质损耗因数。试验数据见表 1。

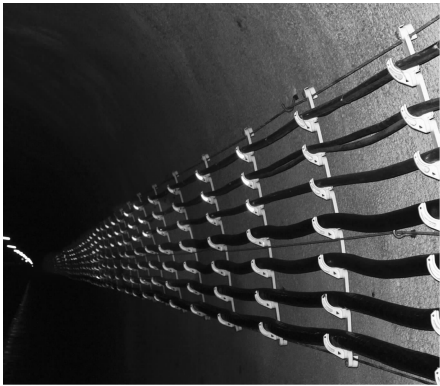


图 1 井下电缆敷设

Fig. 1 Layout of underground cable

表 1 试验数据
Table 1 Test data

温度/℃	介质损耗因数/%	老化时间/h
110	0.502	108
110	0.712	150
110	0.962	229
110	1.222	317
120	0.513	60
120	0.683	102
120	0.933	154
120	1.353	212
130	0.713	49
130	1.063	128
130	1.513	232
130	2.133	412
140	0.770	32
140	0.968	54
140	1.210	88
140	1.710	145

2 基于 GM(1,1)模型的电缆剩余寿命预测

2.1 GM(1,1)模型

GM(1,1)模型是单序列模型,只用到系统行为序列(或输出序列、背景值),而无外作用序列(或输入序列、驱动量)。GM(1,1)模型中的灰色作用量是从行为序列中挖掘出来的数据,反映数据变化关系,其确切内涵是灰的^[18]。电缆剩余寿命与介质损耗因数之间存在变化关系,但相邻的介质损耗因数是**不等距的,因此可使用不等距 GM(1,1)模型。

设 $x^{(0)}(k) (k=1,2,\dots,n, n \in \mathbf{N}^+)$ 为非负数,由其组成非负序列 $X^{(0)} = (x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n))$; $X^{(1)}$ 为由 $X^{(0)}$ 作一次累加生成的 1-AGO 序列,即一次累加序列, $X^{(1)} = (x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n))$, 其中 $x^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i)$; $Z^{(1)}$ 为 $X^{(1)}$ 的紧邻均值生成序列, $Z^{(1)} = (z^{(1)}(2), z^{(1)}(3), \dots, z^{(1)}(n))$, 其中 $z^{(1)}(k) = \alpha x^{(1)}(k) + (1-\alpha) \times x^{(1)}(k-1), k=2,3,\dots,n, \alpha$ 为灰参数, $\alpha=0.5$ 。则 GM(1,1)模型为

$$x^{(0)}(k) + ax^{(1)}(k) = b \quad (1)$$

式中: a 为发展系数的相反数; b 为灰色作用量。

GM(1,1)模型的最小二乘估计参数为

$$\mathbf{A} = (\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{Y} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{A} = [a \quad b]^T$; $\mathbf{B}, \mathbf{Y}$ 为 $\mathbf{A}$ 的中间参数, $\mathbf{B} =$

$$\begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & 1 \\ -z^{(1)}(3) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -z^{(1)}(n) & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{Y} = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \vdots \\ x^{(0)}(n) \end{bmatrix}。$$

GM(1,1)模型的误差为

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{Y} - \mathbf{BA} \quad (3)$$

$\frac{dx^{(1)}(k)}{dt} + ax^{(1)}(k) = b$ 为 GM(1,1)模型的白

化方程,其中 t 为时间。相应的时间响应为

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = \left(x^{(0)}(1) - \frac{b}{a}\right) \exp(-ak) + \frac{b}{a} \quad (4)$$

对式(4)进行累加还原,可得

$$\hat{x}^{(0)}(k+1) = \hat{x}^{(1)}(k+1) - \hat{x}^{(1)}(k) = (1 - \exp(a)) \times \left(x^{(0)}(1) - \frac{b}{a}\right) \exp(-ak) \quad (5)$$

灰色预测理论中对不等距模型的定义为

$$x^{(0)}(f_k) + a\Delta\tau_k z^{(1)}(f_k) = b\Delta\tau_k \quad (6)$$

式中: f_k 为取第 k 个数据时对应的介质损耗因数(第 k 个介质损耗因数); $x^{(0)}(f_k)$ 为第 k 个介质损耗

因数对应的老化时间; $\Delta\tau_k$ 为对不等距模型进行累加还原计算时的间隙变换值; $z^{(1)}(f_k)$ 为生成的紧邻均值。

$$\Delta\tau_k = \frac{\Delta_k}{\Delta_{k\max}} \quad (7)$$

式中: Δ_k 为相邻 2 个介质损耗因数之间的差值, $\Delta_k = f_k - f_{k-1}$; $\Delta_{k\max}$ 为 Δ_k 最大值。

对应的矿用电缆剩余寿命预测不等距 GM(1,1)模型可表示为

$$x^{(0)}(f_k) = \frac{b\Delta\tau_k - a\Delta\tau_k x^{(1)}(f_{k-1})}{1 + (1-\alpha)a\Delta\tau_k} \quad (8)$$

式中 $x^{(1)}(f_{k-1})$ 为第 $k-1$ 个介质损耗因数对应的一次累加生成值。

2.2 实例分析

以 110 °C 下的数据为例,电缆实际老化时间序列 $X^{(0)} = (108, 150, 229, 317)$, 实际老化时间的 1-AGO 序列 $X^{(1)} = (108, 258, 487, 804)$, $X^{(1)}$ 的紧邻均值生成序列 $Z^{(1)} = (183.0, 372.5, 645.5)$, GM(1,1) 模型最小二乘估计参数 $\mathbf{A}$ 的中间参数 $\mathbf{B} =$

$$\begin{bmatrix} -183.0 & 1 \\ -372.5 & 1 \\ -645.5 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{Y} = \begin{bmatrix} 150 \\ 229 \\ 317 \end{bmatrix}。以 k=5 (f_5=1.502) 为$$

例,对电缆剩余寿命预测过程进行分析。数据间隙

变换值 $\Delta\tau_5 = \frac{\Delta_5}{\Delta_{5\max}} = \frac{0.28}{0.26} = 1.0769$ 。实际老化时

间序列包含 4 个数据,从第 5 个数据开始为采用 GM(1,1) 模型预测的数据。 $\mathbf{A} = (\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{Y} =$

$$\begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.358 \\ 88.537 \end{bmatrix}, 即发展系数的相反数 a =$$

-0.358,灰色作用量 $b=88.537$ 。将上述参数代入式(8),则可求出当 $f_5=1.502$ 时,矿用电缆预测老

化时间 $x^{(0)}(f_5) = \frac{b\Delta\tau_5 - a\Delta\tau_5 x^{(1)}(f_4)}{1 + (1-\alpha)a\Delta\tau_5} =$

$$\frac{88.537 \times 1.0769 - (-0.3583) \times 1.0769 \times 804}{1 + (1-0.5) \times (-0.3583) \times 1.0769} \text{ h} = 502.61 \text{ h}。$$

经计算可得, $k \leq 4$ 时 $x^{(0)}(f_k)$ 为累加还原所得的老化时间模拟值, $k > 4$ 时 $x^{(0)}(f_k)$ 为累加还原后的老化时间预测值。模拟值与预测值的计算过程相同,只是模拟值可与实际值进行对比,以判定所建 GM(1,1)模型的精度。经计算可知,当 $k=13$ 时,电缆介质损耗因数 $f_{13}=5\%$,此时预测的电缆老化时间即电缆在该温度下的剩余寿命,为 45 291.06 h $\approx$ 5.17 a。经过误差检验得出 GM(1,1)模型的预测误差,见表 2。

表2 GM(1,1)模型的预测误差
Table 2 Prediction error of GM(1,1) model

老化时间实际值/h	老化时间模拟值/h	残差/h	相对误差/%
150	120.16	29.84	19.89
229	210.25	18.75	8.19
315	320.48	-5.48	1.73

由表2可知,GM(1,1)模型的平均预测误差为9.94%,预测精度为90.06%,满足建模要求。

上述数据是 $\alpha=0.5$ 时的结果。 α 取值不同,则GM(1,1)模型预测精度不同。本文采用MQHOA对不等距GM(1,1)模型进行优化,寻找 α 最优值,以提高模型预测精度。

3 MQHOA 应用

3.1 HQHOA 原理

MQHOA 是一种结构非常简洁的智能优化算法,由王鹏等^[19]于2013年首次提出其基本框架,并成功应用于函数优化、组合优化等问题。MQHOA 包括3个迭代过程:能级稳定过程、能级降低过程、尺度降低过程^[20-21]。

MQHOA 在整个搜索过程中决定其采样操作的核心机制为当前 h 个采样位置对应的正态概率分布 $N(p_j, \sigma_s^2)$,其中 p_j 为第 j ($j=1, 2, \dots, h$)个高斯概率密度函数的中心, σ_s^2 为高斯概率密度函数的方差。定义MQHOA当前波函数 $|\psi(l)|^2$ 为 h 个正态概率分布 $N(p_j, \sigma_s^2)$ 的叠加,即

$$|\psi(l)|^2 = \sum_{j=1}^h N(p_j, \sigma_s^2) = \sum_{j=1}^h \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_s} \exp\left[-\frac{(l-p_j)^2}{2\sigma_s^2}\right] \quad (9)$$

式中 l 为波函数 $|\psi(l)|^2$ 从高能态向基态收敛过程中偏离平衡位置的距离。

从概率上理解波函数就是当前迭代过程中全局最优解的可能概率分布,MQHOA全部迭代过程都是为了使波函数的概率分布向最优解位置集中。

为了避免陷入局部最优解,MQHOA利用量子隧道效应跳出局部最优区域。设 $[c, d]$ 为全局最优区域,在尺度为 σ_s 时落入局部最优区域的一个高斯采样 $N(p_j, \sigma_s^2)$,在每次迭代过程中都会有一定的概率跳出局部最优区域,从而使采样中心位置进入全局最优区域。

$N(p_j, \sigma_s^2)$ 的采样位置在每次迭代中进入全局最优区域的采样点数为

$$N_{p_j} = m \int_c^d \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_s} \exp\left[-\frac{(l-p_j)^2}{2\sigma_s^2}\right] dl \quad (10)$$

式中 m 为每个高斯分布进行随机采样的次数。

h 个采样区域在尺度 σ_s 进行迭代时,依据量子隧道效应落入全局最优区域的采样点数为

$$N = m \int_c^d \psi_{\text{QHO}}(l) dl = m \int_c^d \sum_{j=1}^h \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_s} \exp\left[-\frac{(l-p_j)^2}{2\sigma_s^2}\right] dl \quad (11)$$

式中 $\psi_{\text{QHO}}(l)$ 为谐振子迭代过程的波函数,即概率波函数,近似代表目标函数最优解位置在目标函数定义域上的概率密度。

MQHOA核心是使最优解位置一直位于波函数的概率密度函数中心,从而以最大概率获得全局最优解。

3.2 实例分析

仍以110℃下电缆加速湿热老化试验数据为例,以老化时间模拟值与实际值的误差平方差最小为目标函数,采用MQHOA对不等距GM(1,1)模型进行优化,在 $\alpha \in [0, 1]$ 区间内寻找 α 最优值,得 $\alpha=0.9868$ 时老化时间模拟值与实际值之间的误差平方差最小。此时对老化时间实际值、模拟值及优化的模拟值进行对比,如图2所示。可看出经MQHOA优化的GM(1,1)模型预测的电缆老化时间模拟值比优化前更接近实际值,即更能反映电缆的真实老化过程。经计算,优化后GM(1,1)模型的平均预测误差为3.268%,预测精度为96.732%,均优于优化前的模型。110℃下,经MQHOA优化的GM(1,1)模型对电缆剩余寿命的预测值为31992.75 h $\approx$ 3.652 a。

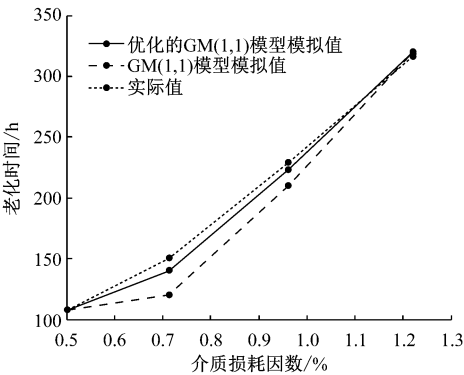


图2 110℃下电缆老化时间
Fig. 2 Cable aging time under 110℃

4 电缆剩余寿命预测试验

在 140,130,120,110 ℃ 下获得不同老化时间及对应的介质损耗因数,建立 GM(1,1)模型预测不同温度下的电缆剩余寿命;然后利用不同温度下的寿命数据重新建模,以预测正常工作温度(不超过 90 ℃)下电缆剩余寿命,在预测过程中采用 MQHOA 优化 GM(1,1)模型参数。电缆剩余寿命预测值见表 3,其分布如图 3 所示。

由表 3 可知,较高温度时电缆剩余寿命预测值在 GM(1,1)模型优化前后差别较小,正常工作温度下电缆剩余寿命预测值在优化前后差别较大,如 90 ℃ 时分别为 22.783,20.560 a。由上文可知,经 MQHOA 优化后,GM(1,1)模型预测精度更高,因此电缆剩余寿命为 20.560 a 更可信。

表 3 不同温度下电缆剩余寿命预测值
Table 3 Residual life prediction value of cable under different temperature

温度/℃	电缆剩余寿命预测值/a	
	GM(1,1)模型	优化的 GM(1,1)模型
140	0.480	0.480
130	0.606	0.648
120	1.602	1.651
110	3.652	3.576
100	8.707	8.390
90	22.783	20.560
80	64.403	52.349

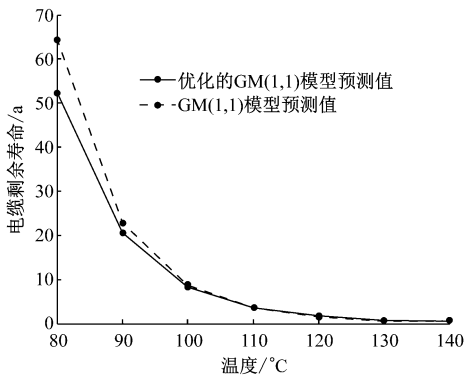


图 3 不同温度下电缆剩余寿命预测值分布曲线
Fig. 3 Distribution curve of residual life prediction value of cable under different temperature

从图 3 可看出,随着温度升高,电缆剩余寿命不断降低,且下降趋势符合指数规律。

5 结论

(1) 考虑到矿用电缆加速湿热老化试验耗时

长,采用灰色预测 GM(1,1)模型,根据一定量数据之间的关联性,挖掘灰色作用量,以较少的数据实现电缆剩余寿命预测,减少了试验时长。

(2) 采用 MQHOA 对 GM(1,1)模型参数进行优化,优化后的模型提高了电缆剩余寿命预测精度。

参考文献(References):

[1] 杨颖,游蛟,贾志东,等. 10 kV 交联聚乙烯电缆运行状态评估分析[J]. 高电压技术, 2017, 43(5): 1684-1692.
YANG Ying, YOU Jiao, JIA Zhidong, et al. Evaluation analysis of 10 kV XLPE cable's operation condition[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(5):1684-1692.

[2] 王鹤荀. 船舶电缆绝缘老化规律及快速检测方法研究[D]. 大连:大连海事大学,2014.

[3] 王志强,周长亮,李文文,等. 船用丁基橡胶绝缘电缆剩余寿命评估[J]. 中国电机工程学报,2012,32(34): 189-195.
WANG Zhiqiang, ZHOU Changliang, LI Wenwen, et al. Residual life assessment of butyl rubber insulated cables in shipboard[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(34):189-195.

[4] 程博. XLPE 绝缘电缆可靠性与寿命预测算法研究[D]. 广州:华南理工大学,2014.

[5] 解磊. 电力电缆故障统计模型研究[D]. 济南:山东大学,2013.

[6] 喻岩珑,李晟,孙辉,等. XLPE 电缆绝缘老化与剩余寿命评估的试验方法[J]. 电网与清洁能源,2011,27(4):26-29.
YU Yanlong, LI Sheng, SUN Hui, et al. Test method for aging of XLPE cable insulation and remaining life assessment[J]. Power System and Clean Energy, 2011,27(4):26-29.

[7] 褚晓锐,钱波. 电缆介质损耗角正切的测量[J]. 光纤与电缆及其应用技术,2008(4):13-15.
CHU Xiaorui, QIAN Bo. Measurement of dielectric loss $\tan \delta$ on cable[J]. Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications,2008(4):13-15.

[8] 袁燕岭,李世松,董杰,等. 电力电缆诊断检测技术综述[J]. 电测与仪表,2016,53(11):1-7.
YUAN Yanling, LI Shisong, DONG Jie, et al. A review on diagnostic testing technique of electrical power cables [J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2016,53(11):1-7.

[9] 梁经宛,刘志远,姜帅,等. 长寿命电气二次设备的加速试验方法[J]. 电测与仪表,2014,51(10):39-44.
LIANG Jingwan, LIU Zhiyuan, JIANG Shuai, et al. Accelerated life test method of the long-life secondary

- power equipment [J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2014, 51(10): 39-44.
- [10] 谭源源, 张春华, 陈循, 等. 基于加速寿命试验的剩余寿命评估方法[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(2): 150-154.
- TAN Yuanyuan, ZHANG Chunhua, CHEN Xun, et al. Remaining life evaluation based on accelerated life testing[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(2): 150-154.
- [11] 张慰, 李晓阳, 姜同敏, 等. 基于 BP 神经网络的多应力加速寿命试验预测方法[J]. *航空学报*, 2009, 30(9): 1691-1696.
- ZHANG Wei, LI Xiaoyang, JIANG Tongmin, et al. Life-prediction of multi-stress accelerated life testing based on BP algorithm of artificial neural network [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2009, 30(9): 1691-1696.
- [12] YANG Jingyue, YAO Jun, SONG Yan, et al. An evaluation method of step-down stress accelerated life test based on Amsaa model[C]//IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, Singapore, 2015: 812-816.
- [13] LIU Kai, LYU Congmin, DANG Wei, et al. Research on reliability assessment of space electronic products based on integration of highly accelerated life test and accelerated degradation test[C]//IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, Bali, 2016: 1651-1654.
- [14] MT 818. 11—2009 煤矿用电缆 第 11 部分: 额定电压 10 kV 及以下固定敷设电力电缆一般规定[S].
- [15] 刘英, 王林杰, 苏宇, 等. 基于 0.1 Hz 下 $\tan \delta$ 的 XLPE 电缆绝缘老化状态评估技术[J]. *绝缘材料*, 2016, 49(5): 41-45.
- LIU Ying, WANG Linjie, SU Yu, et al. Ageing condition assessment of XLPE cable insulation based on $\tan \delta$ at 0.1 Hz[J]. *Insulating Materials*, 2016, 49(5): 41-45.
- [16] WANG Y, ZHAO A, ZHANG X, et al. Study of dielectric response characteristics for thermal aging of XLPE cable insulation[C]//International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Xi'an, 2016: 602-605.
- [17] MECHERI Y, MEDJDOUB A, BOUBAKEUR A, et al. Characterization of laboratory aged MV XLPE cables using dielectric losses factor measurements [C]//International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb, Tunis, 2014: 1-4.
- [18] 刘思峰, 党耀国, 方志耕, 等. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [19] 王鹏, 黄淼, 李波, 等. 多尺度量子谐振子优化算法[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2013.
- [20] 王梓懿, 安俊秀, 王鹏. 基于多尺度量子谐振子算法的相空间概率聚类算法[J]. *计算机应用*, 2017, 37(8): 2218-2222.
- WANG Ziyi, AN Junxiu, WANG Peng. Phase space probabilistic clustering algorithm based on multi-scale quantum harmonic oscillator algorithm[J]. *Journal of Computer Applications*, 2017, 37(8): 2218-2222.
- [21] 韩虎, 王鹏, 程琨, 等. 基于多尺度量子谐振子算法的云计算任务调度[J]. *计算机应用*, 2017, 37(7): 1888-1892.
- HAN Hu, WANG Peng, CHENG Kun, et al. Task scheduling algorithm for cloud computing based on multi-scale quantum harmonic oscillator algorithm [J]. *Journal of Computer Applications*, 2017, 37(7): 1888-1892.