

时温平移法核级电缆热老化寿命评估及应用

卢燕芸 顾申杰 楼天杨
(上海核工程研究设计院 上海 200233)

摘要 基于时温平移法,根据非线性规划最优化确定平移因子,平移各温度组内老化寿命数据至参考温度,建立核级电缆热老化寿命模型。作为电缆老化状态监测管理必不可缺的工具,所建立的老化寿命模型可由状态指标推算电缆剩余寿命。基于此技术在 Matlab GUI 平台下开发的核级电缆热老化寿命评估的人机交互界面具有标准法、平移法两种计算模式,并能实现平移因子优化、活化能计算、老化寿命曲线拟合、老化机理一致性分析等功能。

关键词 核级电缆,热老化寿命模型,时温平移,断裂伸长率

中图分类号 TL362.7

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2014.hjs.37.070603

核电站内电缆工作环境严酷,电缆必须在特定的温度、辐照、压力、湿度、蒸汽、振动等多因素综合环境下长时间工作^[1-2]。所有这些因素都将会对电缆产生累积影响,随着时间的推移,电缆可能会出现不可逆的物理和化学变化。因此,核级电缆必须严格按照 IEEE 323^[3]、IEEE 383^[4]等标准进行设备合格鉴定,并在电缆服役过程中监测其状态,保证核电站的安全运行。为模拟电缆主导老化因素—热氧老化对电缆寿命的影响,根据时温平移原理,经非线性规划最优化的平移因子可整合各温度组内老化寿命至参考温度下,构造热老化寿命曲线。在此老化模型下可根据状态指标反推电缆剩余寿命,这是电缆寿命管理的先决技术之一。此外,据此原理在 Matlab GUI 平台下开发的核级电缆热老化寿命评估软件人机交互界面友好,同时具备构造电缆老化寿命模型、计算活化能、分析老化机理一致性等功能。

1 热老化寿命模型发展现状

迄今为止,核级电缆的鉴定通过耐热性评定试验确定电缆材料的活化能,并没有将通过数据处理建立电缆热老化寿命的进一步实践。耐热性评定试验按照 IEC 60216-1^[5]标准进行。试验在三个及以上高温试验组下,以试样寿命断裂伸长率保留率(Elongation at Break, EAB) 50%为功能失效终点,并按 IEC 60216-3^[6]标准要求处理数据,计算材料活化能及 20 000 h 温度指数和半差,但材料老化状态趋势曲线无法确定。

核级电缆热老化寿命模型建立 EAB 与老化寿命相关关系,以 EAB 表征电缆的实际状态, EAB 为材料在拉伸至断裂时伸长量增长率比值。研究发现^[7], EAB 与多种电缆护套、绝缘材料老化程度明显相关,具有极佳的寿命跟踪特性。但是由于其试验具有破坏性,因此无法直接用于电缆老化监测。尽管如此,因其良好的特性,将 EAB 作为基准指标标定电缆的热老化寿命曲线。应用其它无损状态监测方法时,可通过与 EAB 建立关联确定电缆的实际状态,推算电缆剩余寿命。

2 材料热老化的高温加速评估

建立热老化寿命模型的试验可照搬耐热性评定试验要求以 IEC 60216-1 为标准进行。将试样置于高温下,以推进材料的老化进程,预期在短时间内模拟材料在较低温度下的老化状态。

阿伦纽斯方程(Arrhenius Equation)是高温加速热老化的理论基础,其适用于在预测高温下热氧老化导致的电缆绝缘、护套等非金属材料性能的劣化。该模型建立的前提是,在一定温度范围内,材料老化由单一或主导化学反应确定^[8-9]。

$$K = A \cdot e^{-\frac{E_a}{R \cdot T}} \quad (1)$$

式中, K 为反应速率; A 为前因子; E_a 为活化能, $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$; R 为波尔兹曼常数, $8.617 \times 10^{-5} \text{ eV} \cdot \text{K}^{-1}$; T 为温度, K 。

第一作者:卢燕芸,男,1989年出生,2011年毕业于上海交通大学,主要研究方向为核电厂电缆鉴定及老化管理
收稿日期:2014-03-11,修回日期:2014-03-25

2.1 时温平移方法

时温平移方法是将各试验温度组内 EAB 与试验时间数据汇总, 选取最低试验温度或合适温度作为参考温度 T_{ref} , 将各试验温度组内数据沿时间轴水平方向向参考温度数据群移动, 形成主数据群, 以主群内所有数据为基准拟合形成电缆材料老化寿命曲线^[10], 如图 1 所示。期间, 各试验温度 T_i 下的平移因子 a_{T_i} :

$$a_{T_i} = \frac{t_{\text{ref}_i}}{t_{T_i}} \quad (2)$$

式中, t_{ref_i} 为自试验温度 T_i 平移至参考温度 T_{ref} 后对应的老化时间; t_{T_i} 为试验温度 T_i 下曲线在平移前的老化时间。

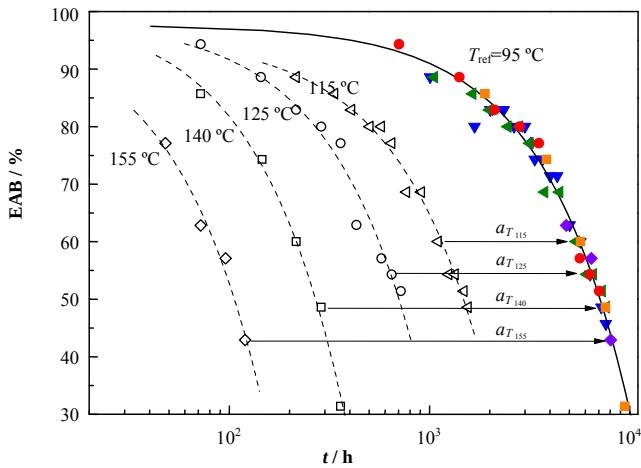


图 1 时间平移法构造老化寿命主曲线

Fig.1 Life model graph of test data by superposition.

同样可将参考温度 T_{ref} 下老化曲线沿时间轴平移至电缆实际工作温度 T_{real} 得到在实际工况下电缆的老化曲线:

$$t_{\text{real}} = \frac{t_{\text{ref}}'}{a_{T_{\text{real}}}} = t_{\text{ref}}' \cdot e^{\frac{E_a}{R} \left(-\frac{1}{T_{\text{ref}}} + \frac{1}{T_{\text{real}}} \right)} \quad (3)$$

式中, t_{ref}' 为拟合主曲线时间轴坐标。

各温度组内移至主数据群下的平移因子为待优化参数, 以电缆 EAB 与时间曲线线性拟合后的拟合优度最高为优化目标函数, 该有约束非线性归化问题数学模型建立如下:

$$\max R^2 = \frac{l_{xy}^2}{l_{xx} \cdot l_{yy}} \quad (4)$$

$$s.t. \quad a_{T_1} = 1; \quad a_{T_i} \geq 1 (i = 2, \dots, n);$$

其中:

$$l_{xx} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{k_i} (a_{T_i} \cdot t_{ij})^2 - \frac{1}{\sum_{i=1}^n k_i} \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{k_i} a_{T_i} \cdot t_{ij} \right)^2 \quad (5)$$

$$l_{yy} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{k_i} E_{ij}^2 - \frac{1}{\sum_{i=1}^n k_i} \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{k_i} E_{ij} \right)^2 \quad (6)$$

$$l_{xy} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{k_i} a_{T_i} \cdot t_{ij} \cdot E_{ij} - \frac{1}{\sum_{i=1}^n k_i} \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{k_i} a_{T_i} \cdot t_{ij} \right) \cdot \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{k_i} E_{ij} \right) \quad (7)$$

式中, $i = 1, \dots, n$ 是各温度试验组顺序号; $j = 1, \dots, k_i$ 是第 i 组内顺序号; E_{ij} 为各组下各老化时间对应性能值; t_{ij} 为各组下老化时间。

以材料性能 E 为参变量, 与老化时间 t 关联建立一元线性回归方程 $E = A + Bt$, 其参数为:

$$\begin{cases} A = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{k_i} E_{ij}}{\sum_{i=1}^n k_i} - B \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{k_i} t_{ij}}{\sum_{i=1}^n k_i} \\ B = \frac{l_{xy}}{l_{xx}} \end{cases} \quad (8)$$

其间, 通过优化后平移因子可确定各组数据点在参考温度 T_{ref} 下的位置, 将平移到参考温度下的所有数据线性拟合。

2.2 误差分析

由于测定电缆性能值将会受到环境、操作人员、测量设备等其它偶然因素影响, 可能会出现高于正常测量范围的粗大误差, 从而影响曲线的有效拟合。为剔除粗大数据, 根据肖维勒原理^[11]可筛选显著的误差。

在 N 个实验数据中取不可能发生的数据个数为 $1/(2N)$, 对正态分布而言, 误差不可能出现概率为:

$$1 - \frac{1}{\sqrt{2}} \int_{-\omega_n}^{\omega_n} e^{-\frac{x^2}{2}} dx = \frac{1}{2N} \quad (9)$$

$$\Phi(\omega_n) = 1 - \frac{1}{4N} \quad (10)$$

$$\left| E_{ij} - A - B \cdot a_{T_i} \cdot t_{ij} \right| > \omega_n \cdot \sigma \quad (11)$$

根据标准正态分布函数表确定肖维勒系数 ω_n ，试验测量值应等精度且呈正态分布，因此，若其残差大于肖维勒系数与标准差的积，可判定该点数据为异常值，应予以剔除。在剔除异常数据后，应再次优化计算平移因子并重新拟合主曲线，按肖维勒准则再次判定，直至无异常值后，可最终确定电缆材料老化寿命模型。

2.3 活化能计算

由式(1)，设 t 为老化时间，其与反应速率 K 成反比：

$$t = A^{-1} \cdot e^{\frac{E_a}{R \cdot T}} \quad (12)$$

$$\begin{cases} t_{\text{ref}_i} = A^{-1} \cdot e^{\frac{E_a}{R \cdot T_{\text{ref}}}} \\ t_{T_i} = A^{-1} \cdot e^{\frac{E_a}{R \cdot T_i}} \end{cases} \quad (13)$$

$$a_{T_i} = \frac{t_{\text{ref}_i}}{t_{T_i}} = e^{\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_{\text{ref}}} - \frac{1}{T_i} \right)} \quad (14)$$

其对数形式为：

$$\ln(a_{T_i}) = \frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_{\text{ref}}} - \frac{1}{T_i} \right) \quad (15)$$

以 $1/T_i$ 为自变量， $\ln(a_{T_i})$ 为参变量，将曲线拟合后可计算材料活化能值。

3 软件主要模块

本文在 Matlab GUI 平台^[12]下建立基于平移法的热老化寿命评估模型，并构建核级电缆老化计算程序。该程序主要实现数据 I/O、双模式选择、参数及曲线图显示、平移微调控制等功能。

3.1 源数据提取

点击界面上文件夹图标按钮，可选择原始试验数据存储位置。随后，从原始试验数据中提取必需数据并剔除标注等无用信息，并在界面地址栏中显示源数据地址。若选择的原始试验数据格式错误，将会弹出报错窗口，并重新选择源数据。

3.2 模式选择

在提取源数据后，将会弹出窗口，选择后续计算模式。后续计算模式包括两种：(1) 标准模式，按照 IEC 60216-3 数据处理法计算；(2) 平移模式，按照时温平移法流程优化老化寿命模型，并计算活化能。在选择模式后，在状态栏显示当前工作模式。

3.3 标准模式

在标准模式下，按 IEC 60216-3 第 6.1.4 节要求对破坏性 EAB 试验每一温度试验组内的每一性能值，根据概算回归方程估算对应的老化终点时间。再按第 6.2 节要求进一步计算分析，在界面上显示耐热老化曲线图及斜率、截距、标准差、拟合优度等参数，计算并显示活化能、20 000 h 温度指数 T_i 、半差 HIC。

3.4 平移模式

在平移模式下，按§2.1 步骤将各温度 EAB 值经平移因子平移后拟合形成寿命主曲线并显示，计算活化能值，显示活化能计算曲线、显示平移因子表、分析老化机理一致性、显示老化寿命三维图、显示老化曲线及活化能曲线的斜率、截距、标准差、拟合优度等参数、显示 20 000 h 温度指数 T_i 、半差 HIC。

3.5 寿命计算模块

在标准模式下，电缆失效 EAB 为 50%，可任意设置电缆实际运行温度，计算该工况下电缆材料寿命；在平移模式下，可任意设置电缆实际运行温度及失效 EAB 标准，根据设定工况计算并显示该种电缆材料寿命。此外，拟合老化曲线还将平移至设置运行温度下，并在界面中显示。

3.6 输出模块

输出模块包括数据存储及截屏储存两部分。点击界面上磁盘图标按钮，可以将曲线参数、平移因子、平移后主曲线数据、残差、活化能、材料温度指数等以 Excel 格式存储在不同表单(Sheet)下，在数据保存后，将会在状态栏显示存储文件名。点击界面上打印图标按钮，可以将当前界面截屏，弹出保存窗口，可修改文件名称、修改截屏图片保存格式等。

3.7 图形控制模块

图形曲线的主要操作功能包括：

(1) 图形放缩功能：点击界面工具栏中的放大

镜按钮, 在图形上连续点击鼠标实现;

(2) 图形移动功能: 点击界面工具栏中的手形按钮, 可拖动图形;

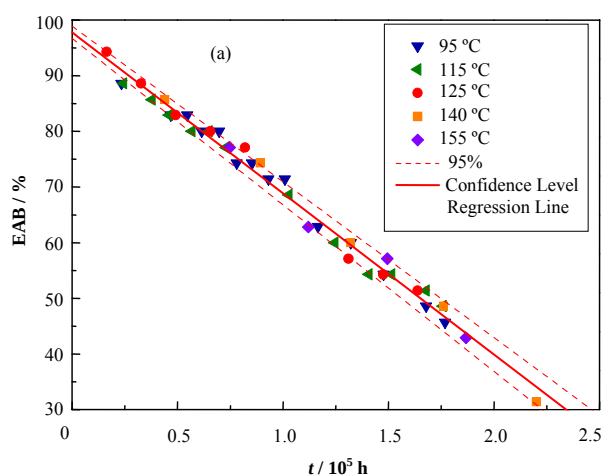
(3) 数据点跟踪: 点击界面工具栏中的数据跟踪按钮, 可显示曲线上选中数据的精确坐标。

3.8 平移控制调整模块

在平移模式下, 为满足微调各组数据平移量的需要, 设计有微调平移因子控制数据平移量的功能。可在平移控制面板下拉框内分别选择数据组和平移单位, 通过加、减两个按键控制平移因子, 在“平移因子值”栏内实时更新当前数据。每次平移因子调整老化曲线都会再次拟合, 并同步更新活化能及曲线参数、材料温度指数等。

3.9 老化寿命拟合模块

在平移模式下, 调用 Matlab 最优化工具箱, 编程优化各组试验值的平移因子, 按式(9)–(11)筛除异常点, 返回再次优化, 循环直至无显著误差。计算并显示各参数、绘制老化寿命曲线图、活化能曲线图。在标准模式下, 按 IEC 60216-3 数据处理法计算活化能, 并绘制耐热曲线。



3.10 一致性分析模块

在平移模式下, 考虑到部分非金属材料在不同温度区间的老化机制不同, 若试验温度恰好跨越该温度区间, 将会导致活化能与工况环境下电缆老化机制相左。该模块将三组低温试验组拟合得出活化能值与三组高温试验组拟合得出活化能值进行比较, 当活化能差异率较大时, 判定试验温度区间内老化机制不一致, 采信保守值 (低温点结果)。

4 试验数据结果分析

一种样品电缆在 95 °C、115 °C、125 °C、140 °C 和 155 °C 下进行热老化加速试验并定时测量 EAB, 以 50% 为失效点, 通过时温平移法, 不同温度试验数据基本分布在拟合曲线 95% 置信度范围内, 如图 2(a) 所示。此外, 在残差图中 (图 2(b)) 所有残差范围过零点, 即所有实测数据与拟合曲线的残差有 95% 可能落在拟合曲线上, 且推算的老化寿命模型拟合优度高达 0.999 96, F 检验下的显著性指标 P 达 3.29×10^{-7} 。

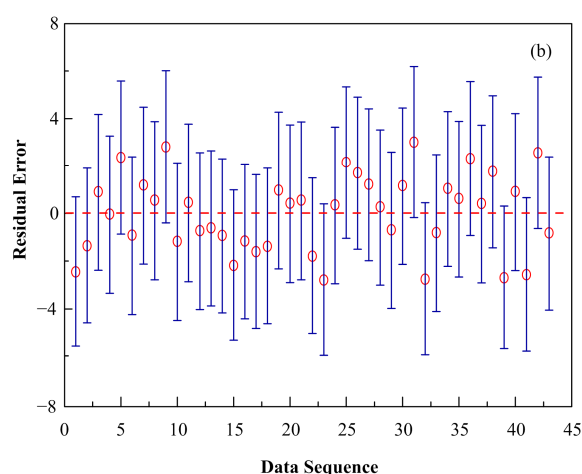


图 2 60 °C 下电缆老化寿命曲线(a)及残差图(b)
Fig.2 Cable aging regression curve at 60 °C (a) and data residual error (b).

时温平移法下的拟合曲线由各温度组下所有试验数据经平移拟合而成, 参与数据有 46 个; 而标准法下每一温度试验组内仅根据概算回归方程估算对应终点时间, 每组仅 1 个数据参与拟合, 拟合数据共 5 个。时温平移法的统计样本比标准方法大得多, 且计算活化能的拟合优度更高, 表征线性度的指标显著性值 P 也比标准法高 2 个数量级, 从而证明时温平移法相较于标准法, 其结果更加精确。时温平

移法活化能曲线如图 3(a), 标准法活化能计算曲线如图 3(b) 所示。通过比较数据发现 (表 1), 平移法活化能 $91.64 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ 与标准法活化能 $97.41 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ 相差 6.30%, 而在 60 °C 环境下, EAB 为 50% 下的电缆寿命相差 11.0 a, 差异率达 58.5%。可见核级电缆的活化能值的细微差异将会导致老化寿命出现不可接受的误差, 因而通过时温平移法精确计算活化能对正确评估电缆老化寿命具有重要意义。

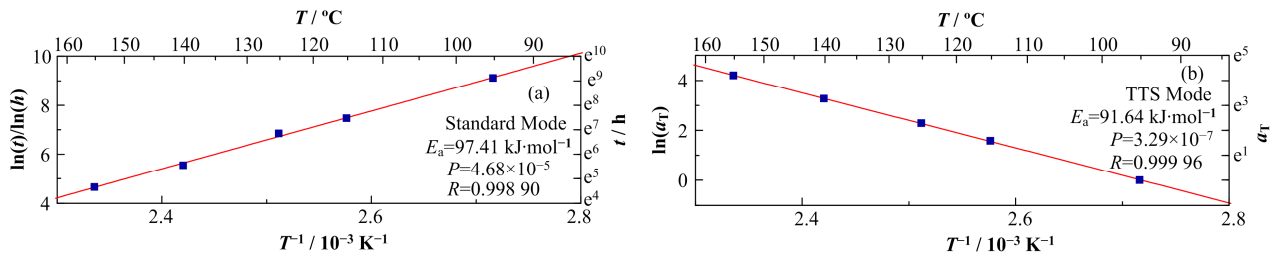


图3 标准模式(a)及平移模式(b)活化能计算曲线
Fig.3 Activation energy regression curve by standard mode (a) and superposition mode (b).

表 1 时温平移法与标准法计算结果比对
Table 1 Calculation results comparison between superposition method and standard method.

参数 Parameter	时温平移法 Superposition mode	标准法 Standard mode
活化能 / kJ·mol ⁻¹ Activation energy	91.64	97.41
拟合优度 R Correlation coefficient	0.999 96	0.998 90
显著性值 P Probability	3.29×10 ⁻⁷	4.68×10 ⁻⁵
拟合数据数 Data amount	46	5
平移因子 Superposition factor	$a_{T_{95}}=1.000\ 0$ $a_{T_{115}}=4.850\ 6$ $a_{T_{125}}=9.795\ 5$ $a_{T_{140}}=26.304\ 7$ $a_{T_{155}}=66.994\ 8$	N/A
60 °C, EAB=50% 寿命 / a Lifetime at 60 °C	18.8	29.8
20 000 h T _i	82.70	86.25
20 000 h HIC	8.15	7.81

5 结语

时温平移法作为一种加速老化数据外推方法，可改进现有核级电缆热老化寿命评估模型。由于将所有数据平移至主数据群拟合，因此，表征材料老化参数的活化能值计算更精确。此外，它还可将老化主曲线外推至运行温度下，模拟电缆在实际工作环境下的老化趋势，核电厂在建立电缆老化监测体系后，可关联监测状态指标与 EAB，从而反推电缆剩余寿命，它对建立电缆寿命管理体系有重要意义。

本文在 Matlab GUI 平台下对核级电缆的热老化寿命评估处理部分进行可视化编程。由于 Matlab 强大的计算能力和图形模拟能力，在此基础上结合

GUI 人机界面，可以直观显示电缆老化曲线图及参数，简化核级电缆热老化寿命计算操作，提高了活化能值计算的准确度，为电缆老化状态监测后续工作建立参考寿命曲线，具有积极的意义。

参考文献

- 顾申杰. 核电厂 1E 级电气设备环境鉴定[J]. 核安全, 2005, (2): 31-40
GU Shenjie. Environment qualification of class 1E electrical equipment for nuclear power generating stations[J]. Nuclear Safety, 2005, (2): 31-40
- 郑明光, 叶成, 韩旭. 新能源中的核电发展[J]. 核技术, 2010, 33(2): 81-86
ZHENG Mingguang, YE Cheng, HAN Xu. The development of nuclear power as an alternative energy[J]. Nuclear Techniques, 2010, 33(2): 81-86
- Institute of Electrical and Electronic Engineers. IEEE standard for qualifying class 1E equipment for nuclear power generating stations[S]. IEEE Standard 323-2003, New York, 2004
- Institute of Electrical and Electronic Engineers. IEEE standard for qualifying class 1E electric cables and field splices for nuclear power generating stations[S]. IEEE Standard 383-2003, New York, 2004
- International Electro-technical Commission. Electrical insulating materials properties of thermal endurance Part1: ageing procedures and evaluation of test results[S]. IEC 60216-1, Geneva, 2001
- International Electro-technical Commission. Electrical insulating materials thermal endurance properties Part3: instructions for calculating thermal endurance characteristics[S]. IEC 60216-3, Geneva, 2001
- Yamamoto T, Minakawa T. The final report of the project of assessment of cable aging for nuclear power plants[R]. Tokyo: Japan Nuclear Energy Safety Organization, 2009
- International Atomic Energy Agency. Ageing management

- for nuclear power plants, safety standards series safety guide No. NS-G-2.12[R]. Vienna, 2009
- 9 Institute of Electrical and Electronic Engineers. IEEE guide for the statistical analysis of thermal life test data[S]. IEEE Standard 101-2004, New York, 2004
 - 10 杨丽君, 邓帮飞, 廖瑞金, 等. 应用时-温-水分叠加方法改进油纸绝缘热老化寿命模型[J]. 中国电机工程学报, 2011, **31**(31): 196–203
YANG Lijun, DENG Bangfei, LIAO Ruijin, *et al.* Improvement of lifetime model on thermal aging of oil-paper insulation by time-temperature-moisture superposition method[J]. Proceedings of the China Society of Electrical Engineering, 2011, **31**(31): 196–203
 - 11 梁晋文, 陈林才, 何贡. 误差理论与数据处理[M]. 北京: 中国计量出版社, 1989
LIANG Jinwen, CHEN Lincai, HE Gong. The error theory and data processing[M]. Beijing: China Metrology Press, 1989
 - 12 罗华飞. Matlab GUI 设计学习手记[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011
LUO Huafei. Matlab GUI design learning notes[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2011

Nuclear grade cable thermal life model by time temperature superposition algorithm based on Matlab GUI

LU Yanyun GU Shenjie LOU Tianyang

(Shanghai Nuclear Engineering Research & Design Institute, Shanghai 200233, China)

Abstract Background: As nuclear grade cable must endure harsh environment within design life, it is critical to predict cable thermal life accurately owing to thermal aging, which is one of dominant factors of aging mechanism.

Purpose: Using time temperature superposition (TTS) method, the aim is to construct nuclear grade cable thermal life model, predict cable residual life and develop life model interactive interface under Matlab GUI. **Methods:**

According to TTS, nuclear grade cable thermal life model can be constructed by shifting data groups at various temperatures to preset reference temperature with translation factor which is determined by non-linear programming optimization. Interactive interface of cable thermal life model developed under Matlab GUI consists of superposition mode and standard mode which include features such as optimization of translation factor, calculation of activation energy, construction of thermal aging curve and analysis of aging mechanism. **Results:** With calculation result comparison between superposition and standard method, the result with TTS has better accuracy than that with standard method. Furthermore, confidence level of nuclear grade cable thermal life with TTS is higher than that with standard method. **Conclusion:** The results show that TTS methodology is applicable to thermal life prediction of nuclear grade cable. Interactive Interface under Matlab GUI achieves anticipated functionalities.

Key words Nuclear grade cable, Thermal life model, Time temperature superposition, Elongation-at-break

CLC TL362.7