

# 控制与决策

Control and Decision

## 复合绝缘子暴露在自然环境中的可靠性评估

魏淳, 师海燕, 张志强, 刘宝亮, 温艳清

引用本文:

魏淳, 师海燕, 张志强, 刘宝亮, 温艳清. 复合绝缘子暴露在自然环境中的可靠性评估[J]. *控制与决策*, 2023, 38(4): 1085–1091.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.1556>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 考虑生产任务的制造设备关键部件的机会维修优化

Opportunistic maintenance optimization for key components of manufacturing equipment considering production tasks

*控制与决策*. 2023, 38(3): 715–720 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.1254>

#### 双不确定相依竞争失效模型的可靠性评估

Reliability evaluation of dependent competitive failure models with bi-uncertainty

*控制与决策*. 2022, 37(3): 685–689 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1487>

#### 加速冲击损伤退化系统剩余寿命预测及预测维修决策

Remaining useful life prediction and predictive maintenance decision of accelerated shock damage deteriorating system

*控制与决策*. 2022, 37(10): 2647–2656 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.0272>

#### 全寿命周期下退化的大规模系统预防性维修策略优化

Preventive maintenance optimization for deteriorating large-scale systems in life-cycle perspective

*控制与决策*. 2022, 37(9): 2360–2368 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1813>

#### 基于马尔可夫过程的多部件系统劣化状态空间划分模型

Multi-component system state space partition model based on Markov process

*控制与决策*. 2021, 36(2): 418–428 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0480>

# 复合绝缘子暴露在自然环境中的可靠性评估

魏 淳<sup>1†</sup>, 师海燕<sup>2</sup>, 张志强<sup>2</sup>, 刘宝亮<sup>2</sup>, 温艳清<sup>2</sup>

(1. 山西大同大学 物理与电子科学学院, 山西 大同 037009;

2. 山西大同大学 数学与统计学院, 山西 大同 037009)

**摘要:** 复合绝缘子在电力传输系统中,主要功能是实现电气绝缘和机械固定,即在输电线路中防止电流回地和支撑导线.复合绝缘子在规定的机、电负荷和各种环境条件下长期运行会产生劣化,也会遭受过电压、机械应力等外部冲击.复合绝缘子长期暴露在自然环境下的可靠性,对其生产商和线路传输具有重要作用.首先,针对复合绝缘子的老化失效问题,考虑疏水性的自康复过程,对复合绝缘子建立一个自然退化与多种外部冲击共同作用的相依竞争失效模型;然后,对复合绝缘子的可靠度和平均使用寿命进行研究,用极大似然估计的方法对模型中的参数进行估计;最后,利用数值模拟验证模型的有效性.

**关键词:** 复合绝缘子; 可靠性; 疏水性; 竞争失效过程; 混合冲击

中图分类号: TM216

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2021.1556

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



**引用格式:** 魏淳,师海燕,张志强,等.复合绝缘子暴露在自然环境中的可靠性评估[J].控制与决策,2023,38(4):1085-1091.

## Reliability evaluation of composite insulators exposed to natural environment

WEI Chun<sup>1†</sup>, SHI Hai-yan<sup>2</sup>, ZHANG Zhi-qiang<sup>2</sup>, LIU Bao-liang<sup>2</sup>, WEN Yan-qing<sup>2</sup>

(1. College of Physics and Electronics Science, Shanxi Datong University, Datong 037009, China; 2. College of Mathematics and Statistics Science, Shanxi Datong University, Datong 037009, China)

**Abstract:** In the power transmission system, the main function of composite insulators is to achieve electrical insulation and mechanical fixation, that is, to prevent electric current from returning to the ground and support wires in the transmission line. It will be degraded in long-term operation under specified mechanical and electrical loads and various environmental conditions, and will also be subject to external shocks such as overvoltage and mechanical stress. The reliability of composite insulators exposed to the natural environment for a long time plays an important role in composite insulator manufacturers and line transmission. Aiming at the problem of aging and failure of composite insulators and considering the self-healing process of hydrophobicity, a dependent competitive failure model of natural degradation and multiple external shocks is established for composite insulators. The reliability and mean time to failure of composite insulators are studied, and the parameters in the model are estimated using the method of maximum likelihood estimation. Finally, numerical simulation is carried out to verify the effectiveness of the proposed model.

**Keywords:** composite insulators; reliability; hydrophobicity; competitive failure process; mixed shock

## 0 引言

在电力传输系统中,出于安全考虑,绝缘子是一个很重要的因素.瓷和玻璃绝缘子失效的主要原因是电晕放电引起的绝缘子表面的电击穿<sup>[1]</sup>,雨水和雾气凝结沉积的水滴导致绝缘子的疏水性能降低<sup>[2-3]</sup>.因此,延长绝缘子寿命的有效方法是保持绝缘

子的表面干燥和防止水滴积聚在绝缘子表面.在恶劣的天气环境下,硅橡胶复合绝缘子因其良好的疏水性被广泛应用<sup>[4-5]</sup>.然而,这种复合绝缘子长期暴露在自然环境中,由于温度<sup>[6]</sup>、湿度、环境污秽、臭氧<sup>[7]</sup>以及紫外线<sup>[8]</sup>等自然因素的风化腐蚀产生自然退化、过电压<sup>[9]</sup>和机械应力<sup>[10]</sup>等不可抵抗的外部随机冲

收稿日期: 2021-09-06; 录用日期: 2022-01-28.

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(71601101); 山西省高等学校科技创新项目(2020L0463, 2019L0738); 山西大同大学校级项目(2020K9, 2021K2); 山西省基础研究计划(自由探索类)面上项目(20210302124310).

责任编辑: 刘民.

<sup>†</sup>通讯作者. E-mail: jsj\_wei@163.com.

击,共同作用下导致其失效.因此,复合绝缘子暴露在自然环境中的性能需要准确评估.

可靠性模型在评估产品性能方面是一个很重要的工具.近年来,已有很多学者在研究退化模型和随机冲击模型.退化与随机冲击相依的多重竞争失效模型中,为了简化模型,很多文献假设在某一时刻系统或设备只考虑一种随机冲击<sup>[11-12]</sup>,而在工程实践中,有些产品在同一时刻不只受到一种类型的随机冲击<sup>[13-14]</sup>.Gao等<sup>[15]</sup>提出了一种新的冲击效应模型,是多种类型的冲击共同影响的冲击,这种混合冲击的效应有两种:增加退化水平和加快退化速率.复合绝缘子暴露在自然环境中受到过电压和机械应力等不可抵抗的外力因素可以考虑为不同类型的随机冲击.

Wang等<sup>[16]</sup>的研究表明,复合绝缘子的疏水性有一个很重要的性能——自康复性能.复合绝缘子在受到随机冲击后,疏水性能受到损坏,经过一段时间后,疏水性能恢复到一定水平.自康复机制是Cui等<sup>[17]</sup>于2018年提出的,Liu等<sup>[18]</sup>将自康复过程应用于相依竞争失效模型中,Qi等<sup>[19]</sup>认为湿度传感器的自康复水平与冲击的大小相关.Kong等<sup>[20]</sup>提出复合绝缘子受到疏水性能的自然退化与外部随机冲击的共同作用导致了其老化失效,随机冲击对复合绝缘子的影响不是瞬时的,是有持续时间的,外部的随机冲击造成的损坏有自康复功能,经过一段时间的康复,疏水性能恢复至一定水平,自康复过程中还考虑了康复时间和康复水平.Shi等<sup>[21]</sup>认为复合绝缘子的失效阈值是不确定的.

在以往研究中,尚未有学者考虑复合绝缘子受到多种类型的随机冲击的共同作用,这是本文的创新点,也是与文献[20]的不同之处.事实上,复合绝缘子的老化失效不是一种因素导致的,往往是由各种因素的共同作用导致的.多种类型的冲击是异构的,如存在电应力和机械应力两种冲击,各自独立地对复合绝缘子产生影响,从而使用线性加权模型刻画其共同影响的效果具有合理性.多种类型的冲击有可能同时发生,若同时发生,则本文考虑在一定承受范围内,多种冲击独立地形成对复合绝缘子的冲击,并且冲击形成的合力使用线性加权模型体现.基于此,本文提出复合绝缘子遭受了绝缘子表面疏水性能的自身退化与各种外部冲击的混合效应,以及自康复机制的多重相依竞争失效过程的可靠性模型,这种模型更接近复合绝缘子失效的实际情况.根据复合绝缘子的物理失效机制,对复合绝缘子的可靠性进行数学建模和分析.

## 1 模型建立

### 1.1 模型描述

复合绝缘子长期暴露在自然环境中,受到温度、湿度、紫外线以及环境污秽等因素的影响,疏水性能渐渐退化,同时受到过电压与机械外力等外部随机冲击的共同作用,且复合绝缘子在遭受一次外部有害混合冲击后,其内部的物理结构和化学结构受到一定程度地改变或损坏,疏水性退化水平急剧下降,经过一段时间的恢复,疏水性可得到一定程度的康复,但在量上达不到冲击前的程度.

复合绝缘子遭受了由于疏水性退化引起的软失效和各种类型混合冲击引起的硬失效的多重相依竞争失效,无论哪个先失效,均会引起复合绝缘子的失效.

### 1.2 模型建立

在同一时刻,复合绝缘子受到过电压和机械外力等因素引起的冲击共有 $n$ 种类型: $A_1, A_2, \dots, A_n$ ,第 $j$ 次混合冲击的大小为 $Y_j = s_1 Y_{A_1} + s_2 Y_{A_2} + \dots + s_n Y_{A_n}$  ( $j = 1, 2, \dots$ ),不同时刻不同次数的混合冲击 $Y_j$  ( $j = 1, 2, \dots$ )为独立同分布的随机变量.根据应用背景和文献[20-21], $Y_{A_i} \sim N(\mu_{A_i}, \sigma_{A_i}^2)$ , $s_1, s_2, \dots, s_n$ 为 $n$ 种类型的冲击 $A_1, A_2, \dots, A_n$ 的权重,是已知的常数,则 $Y_j \sim N\left(\sum_{i=1}^n s_i \mu_{A_i}, \sum_{i=1}^n s_i^2 \sigma_{A_i}^2\right)$ .第 $j-1$ 次混合冲击与第 $j$ 次混合冲击到达的时间间隔为 $W_j$ ,根据实际应用背景和文献[20],混合冲击的到达服从参数为 $\lambda$ 的泊松分布, $N(t)$ 为到时刻 $t$ 为止发生的冲击数,则 $\sum_{j=1}^{N(t)} Y_j$ 为更新回报过程.

复合绝缘子长期暴露在自然环境中,由于温度、湿度和紫外线等影响,其表面的疏水性会发生退化,疏水性能以静态接触角的大小表征.基于文献[20]和工程实践,疏水性能长期连续的退化路径假设为线性模型 $X(t) = \alpha - \beta t$ ,其中 $\alpha$ 为初始的静态接触角, $\beta$ 为疏水性能的退化率,且 $\beta \sim N(\mu_d, \sigma_d^2)$ , $\sigma_d > 0$ .每次混合冲击均会对复合绝缘子的退化产生影响,第 $j$ 次冲击对退化产生的瞬时减少量为 $Z_j$ , $Z_j$ 与第 $j$ 次冲击的大小 $Y_j$ 正相关, $Y_j$ 越大, $Z_j$ 也越大,假设 $Z_j = cY_j$  ( $c > 0$ ).复合绝缘子在受到第 $j$ 次外部冲击后,疏水性急剧下降 $Z_j$ ,经过一段时间的自我康复 $X_r$ ,康复至 $KZ_j$  ( $0 < K < 1$ )水平,自康复能力 $K$ 仅取决于复合绝缘子本身的特性.自康复过程 $X_r$ 与康复时间 $T_r$ 有关<sup>[20]</sup>,即

$$X_r(T_r) = A_1 + A_2 \exp\left\{-\frac{\log(T_r + 1)}{C}\right\}.$$

其中:  $A_1$ 、 $A_2$  为常数;  $C$  为描述绝缘子内部小分子扩散速率的常数,  $C$  越大, 小分子扩散越快, 疏水性恢复越快. 相较于冲击到达的时间间隔, 自恢复时间较短, 为了简化模型, 假设在下一次冲击到达之前, 恢复过程已完成. 复合绝缘子疏水性总的退化量为

$$X(t) = X_d(t) - \sum_{j=1}^{N(t)} Z_j + X_r(t),$$

其中  $X_r(t)$  为时刻  $t$  疏水性的自恢复过程中恢复的大小, 且  $X_r(t) = K \sum_{i=1}^{N(t)} Z_i$ .

## 2 复合绝缘子的可靠性分析

### 2.1 硬失效模型

在硬失效模型中, 仅考虑外部冲击的作用. 复合绝缘子在遭受了多种外部的随机冲击的共同作用, 混合冲击的大小超过硬失效的阈值  $D$  ( $D$  为常数) 时, 硬失效发生.

**引理 1** 复合绝缘子在遭受外部冲击的过程中, 没有硬失效的可靠度为

$$P_{\text{NHF}}(t) = \sum_{k=0}^{\infty} \left( \Phi \left( \frac{D - \sum_{i=1}^n s_i \mu_{A_i}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n s_i^2 \sigma_{A_i}^2}} \right) \right)^k \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda}. \quad (1)$$

证明

$$\begin{aligned} P_{\text{NHF}}(t) &= \sum_{k=1}^{\infty} P \left\{ \bigcap_{i=1}^k (Y_i < D) \mid N(t) = k \right\} \times \\ &P \{ N(t) = k \} + P \{ N(t) = 0 \} = \\ &\sum_{k=1}^{\infty} (P \{ Y_i < D \})^k P \{ N(t) = k \} + \\ &P \{ N(t) = 0 \} = \\ &\sum_{k=0}^{\infty} \left( \Phi \left( \frac{D - \sum_{i=1}^n s_i \mu_{A_i}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n s_i^2 \sigma_{A_i}^2}} \right) \right)^k \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda}. \quad (2) \end{aligned}$$

引理 1 得证.  $\square$

### 2.2 软失效模型

在软失效模型中, 当复合绝缘子表面疏水性总的退化量  $X(t)$  不超过软失效临界值  $H$  时, 软失效发生.

**引理 2** 复合绝缘子表面的疏水性不发生软失效的可靠度为

$$\begin{aligned} P_{\text{NSF}}(t) &= P \{ X(t) > H \} = \\ &1 - \sum_{k=1}^{\infty} \Phi_1(t, k) \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda} - \end{aligned}$$

$$\Phi \left( \frac{H - (\alpha - \mu_d t)}{\sigma_d t} \right) e^{-\lambda}. \quad (3)$$

证明

$$\begin{aligned} P \{ X(t) > H \} &= 1 - P \{ X(t) \leq H \} = \\ &1 - P \left\{ X_d(t) - \sum_{i=1}^{N(t)} Z_i + X_r(t) \leq H \right\} = \\ &1 - \sum_{k=1}^{\infty} P \left\{ X_d(t) - \sum_{i=1}^k Z_i + K \sum_{i=1}^k Z_i \leq \right. \\ &H \mid N(t) = k \left. \right\} \times P \{ N(t) = k \} - P \{ X_d(t) \leq \\ &H \} P \{ N(t) = 0 \}. \quad (4) \end{aligned}$$

为方便起见, 记为

$$\begin{aligned} P \left\{ X_d(t) - \sum_{i=1}^k Z_i + X_r(t) \leq H \mid N(t) = k \right\} &= \\ P \left\{ X_d(t) - c \sum_{i=1}^k Y_i + cK \sum_{i=1}^k Y_i \leq H \mid N(t) = k \right\} &= \\ \Phi \left( \frac{H - (\alpha - \mu_d t) + c(1 - K)k \sum_{i=1}^n s_i \mu_{A_i}}{\sqrt{\sigma_d^2 t^2 + c^2 (1 - K)^2 k \sum_{i=1}^n s_i^2 \sigma_{A_i}^2}} \right) &\triangleq \\ \Phi_1(t, k). \quad (5) \end{aligned}$$

结合式(4)和(5), 式(3)成立.  $\square$

### 2.3 竞争失效过程的可靠性分析

复合绝缘子表面遭受了由于疏水性退化引起的软失效和各种类型的混合冲击引起的硬失效的多重相依竞争失效过程.

**引理 3** 在多重相依竞争失效过程中, 复合绝缘子的可靠度为

$$\begin{aligned} R(t) &= \\ &\sum_{k=1}^{\infty} \left[ (1 - \Phi_1(t, k)) \left( \Phi \left( \frac{D - \sum_{i=1}^n s_i \mu_{A_i}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n s_i^2 \sigma_{A_i}^2}} \right) \right)^k \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda} \right] + \\ &\left[ 1 - \Phi \left( \frac{H - (\alpha - \mu_d t)}{\sigma_d t} \right) \right] e^{-\lambda}. \quad (6) \end{aligned}$$

证明

$$\begin{aligned} R(t) &= P \left\{ X(t) > H, \bigcap_{j=1}^{N(t)} (Y_j < D) \right\} = \\ &\sum_{k=1}^{\infty} P \left\{ X(t) > H, \bigcap_{j=1}^k (Y_j < D) \mid N(t) = k \right\} \times \\ &P \{ N(t) = k \} + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &P\{X(t) > H|N(t) = 0\}P\{N(t) = 0\} = \\
 &\sum_{k=1}^{\infty} P\{X(t) > H|N(t) = k\}(P\{Y_j < D\})^k \times \\
 &P\{N(t) = k\} + \\
 &P\{X(t) > H|N(t) = 0\}P\{N(t) = 0\}. \tag{7}
 \end{aligned}$$

在式(7)中,有

$$\begin{aligned}
 &P\{X(t) > H|N(t) = k\} = \\
 &1 - P\{X(t) \leq H|N(t) = k\} = \\
 &1 - P\left\{X_d(t) - \sum_{i=1}^k Z_i + X_r(t) \leq H|N(t) = k\right\} = \\
 &1 - \Phi_1(t, k). \tag{8}
 \end{aligned}$$

因此,有

$$\begin{aligned}
 &\sum_{k=1}^{\infty} P\{X(t) > H|N(t) = k\}(P\{Y_j < D\})^k = \\
 &\sum_{k=1}^{\infty} [1 - \Phi_1(t, k)] \left( \Phi\left(\frac{D - \sum_{i=1}^n s_i \mu_{A_i}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n s_i^2 \sigma_{A_i}^2}}\right) \right)^k, \tag{9}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &P\{X(t) > H|N(t) = 0\}P\{N(t) = 0\} = \\
 &[1 - P\{X_d(t) \leq H|N(t) = 0\}]P\{N(t) = 0\} = \\
 &\left[1 - \Phi\left(\frac{H - (\alpha - \mu_d t)}{\sigma_d t}\right)\right]e^{-\lambda}. \tag{10}
 \end{aligned}$$

结合式(9)、(10)和(7),式(6)成立. □

假设复合绝缘子的寿命为 $T$ ,则

$$E(T) = \int_0^{+\infty} R(t)dt. \tag{11}$$

### 2.4 参数估计

根据本文构建的模型,假设复合绝缘子同时受到过电压 $A_1$ 和机械应力 $A_2$ 两种类型的随机冲击.对疏水性的退化率 $\beta$ 分布函数中的参数 $\mu_d$ 、 $\sigma_d^2$ 以及过电压 $A_1$ 和机械应力 $A_2$ 分布函数中的参数 $\mu_{A_1}$ 、 $\sigma_{A_1}^2$ 、 $\mu_{A_2}$ 、 $\sigma_{A_2}^2$ 进行估计.

选取一个型号的复合绝缘子进行加速退化实验,检测性能退化数据和外部冲击数据.检测时刻为 $t_1, t_2, \dots, t_m$ , $m$ 为样本的检测次数,假设性能退化数据(静态接触角)为 $x_1, x_2, \dots, x_m$ .疏水性能的退化路径假设为线性模型 $X_d(t) = \alpha - \beta t$ ,且退化率 $\beta \sim N(\mu_d, \sigma_d^2)$ ,其中退化率分布中的参数 $\mu_d$ 、 $\sigma_d^2$ 未知.根据静态接触角的样本值 $x_1, x_2, \dots, x_m$ ,退化率 $\beta$ 的似然函数<sup>[22]</sup>为

$$L =$$

$$\prod_{i=1}^m \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_d^2}} \exp\left[-\frac{\left(\frac{\alpha - x_i}{t_i} - \mu_d\right)^2}{2\sigma_d^2}\right]. \tag{12}$$

对似然函数两边取对数,得到

$$\begin{aligned}
 \ln L = & \\
 &-\frac{m}{2} \ln 2\pi - \frac{m}{2} \ln \sigma_d^2 - \frac{1}{2\sigma_d^2} \sum_{i=1}^m \left(\frac{\alpha - x_i}{t_i} - \mu_d\right)^2. \tag{13}
 \end{aligned}$$

对式(13)关于参数 $\mu_d$ 、 $\sigma_d^2$ 分别求偏导数,并令其等于0,可得到参数 $\mu_d$ 、 $\sigma_d^2$ 的极大似然估计为

$$\begin{aligned}
 \hat{\mu}_d &= \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{\alpha - x_i}{t_i}, \\
 \hat{\sigma}_d^2 &= \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left(\frac{\alpha - x_i}{t_i} - \hat{\mu}_d\right)^2.
 \end{aligned}$$

对复合绝缘子进行过电压 $A_1$ 和机械应力 $A_2$ 的冲击实验,过电压 $A_1$ 和机械应力 $A_2$ 到达的时刻按照参数为 $\lambda$ ( $\lambda$ 已知)的泊松分布随机产生,测得过电压 $A_1$ 的大小为 $y_{11}, y_{12}, \dots, y_{1p}$ ,机械应力 $A_2$ 的大小为 $y_{21}, y_{22}, \dots, y_{2p}$ .采用同样的估计方法,可得过电压 $A_1$ 的参数 $\mu_{A_1}$ 、 $\sigma_{A_1}^2$ 的极大似然估计为

$$\begin{aligned}
 \hat{\mu}_{A_1} &= \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p y_{1i}, \\
 \hat{\sigma}_{A_1}^2 &= \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p (y_{1i} - \hat{\mu}_{A_1})^2.
 \end{aligned}$$

机械应力 $A_2$ 的参数 $\mu_{A_2}$ 、 $\sigma_{A_2}^2$ 的极大似然估计为

$$\begin{aligned}
 \hat{\mu}_{A_2} &= \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p y_{2i}, \\
 \hat{\sigma}_{A_2}^2 &= \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p (y_{2i} - \hat{\mu}_{A_2})^2.
 \end{aligned}$$

将上述估计参数代入式(6)和(11),便可计算出复合绝缘子的可靠度估计和平均寿命估计.

### 3 数值模拟

复合绝缘子长期工作在不确定的户外环境,经历着多重相竞争失效过程.考虑到复合绝缘子的疏水性有一定的自康复性能,建立了有自康复过程的混合冲击模型.在模拟中假设复合绝缘子受到了过电压 $A_1$ 和机械负荷 $A_2$ 两种类型的混合冲击,且 $Y_{A_i} \sim N(\mu_{A_i}, \sigma_{A_i}^2)$ , $i = 1, 2$ .由于复合绝缘子应用环境的复杂性,寿命周期长,大量的故障数据难于获得,利用真实的退化故障数据研究其可靠性不易实现.为了评估复合绝缘子的可靠性,及时对复合绝缘子进行维护和退运提供依据,进行数值实验分析其可靠性很有必要.根据文献[9, 16, 20, 23]中复合绝缘子

的实验结果,结合复合绝缘子在实际应用中承受的电压、机械应力的大小和疏水性退化等因素,模型中参数的取值如表1所示。

表 1 模型的参数值

参数	值	来源
$\lambda$	1/300	文献[20]
$\alpha$	$5\pi/6$ rad	文献[16]
$\mu_d$	0.000 009 rad	假设
$\sigma_d$	0.000 009 rad	假设
$c$	0.000 14	假设
$H$	$\pi/2$ rad	文献[20]
$D$	5 000	假设
$n$	2	假设
$\mu_{A_1}$	700 kV	文献[9]
$\mu_{A_2}$	380 kN	文献[9]
$\sigma_{A_1}$	80 kV	文献[9]
$\sigma_{A_2}$	9 kN	文献[9]
$K$	0.95	文献[23]
$s_1$	1.8	假设
$s_2$	2.5	假设

3.1 可靠度函数的敏感性分析

对复合绝缘子的可靠度函数进行敏感性分析,如图1~图4所示.由图1可见,随着软失效阈值  $H$  从  $\pi/2$  降至  $\pi/4$ ,复合绝缘子的可靠度升高.这是因为  $H$  越小,疏水性能由于自然退化导致失效的可能性越小,便越不容易失效,可靠度越高。

由图2可见,随着冲击到达的参数  $\lambda$  越大,复合绝

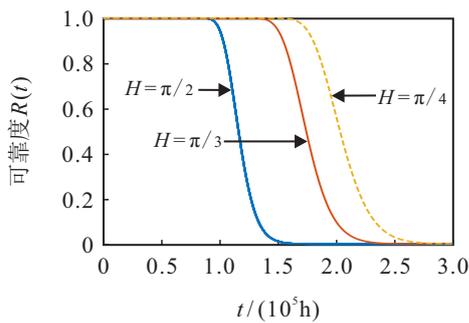


图 1 可靠度  $R(t)$  对  $H$  的敏感性分析

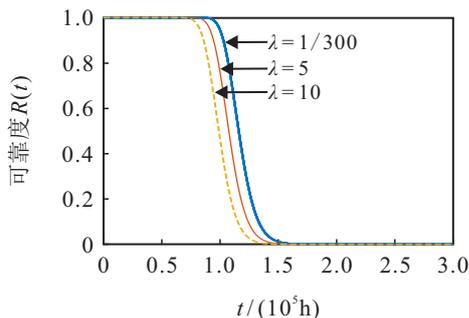


图 2 可靠度  $R(t)$  对  $\lambda$  的敏感性分析

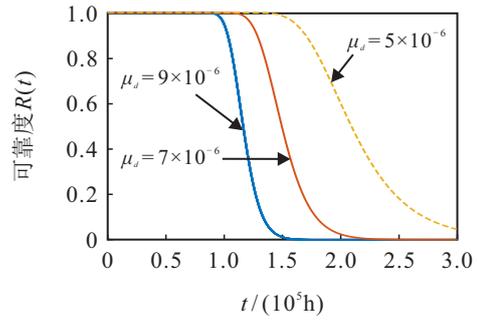


图 3 可靠度  $R(t)$  对  $\mu_d$  的敏感性分析

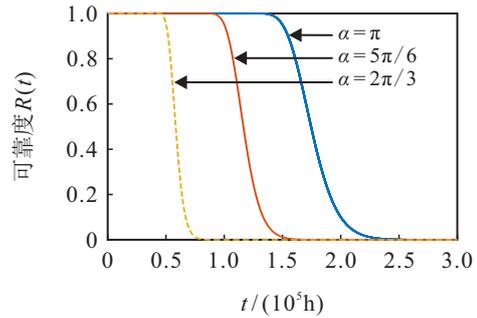


图 4 可靠度  $R(t)$  对  $\alpha$  的敏感性分析

缘子的可靠度越低.这是因为  $\lambda$  越大,意味着冲击到达的速率越大,加快了复合绝缘子硬失效的速度,可靠度降低。

由图3可见,自然退化率的参数  $\mu_d$  越大,可靠度越低,这是符合实际工程应用的.  $\mu_d$  越大,退化的速度越快,可靠度越低.复合绝缘子的可靠度随着疏水性能初始的静态接触角  $\alpha$  的变小而降低,如图4所示.  $\alpha$  越小,表明复合绝缘子的疏水性能越差,越亲水.在实际应用中,复合绝缘子的疏水性能越差,电晕放电引起失效的可能性便越高,可靠度越低。

3.2 平均寿命

为了说明参数的取值大小对复合绝缘子寿命的

表 2 平均寿命

参数	平均寿命/年
$H = \pi/2$	13.42
$H = \pi/3$	20.13
$H = \pi/4$	23.48
$\mu_d = 0.000\ 009$	13.42
$\mu_d = 0.000\ 007$	17.37
$\mu_d = 0.000\ 005$	24.56
$\lambda = 1/300$	13.42
$\lambda = 5$	12.43
$\lambda = 10$	11.44
$\alpha = \pi$	20.13
$\alpha = 5\pi/6$	13.42
$\alpha = 2\pi/3$	6.71

影响,对复合绝缘子在不同的参数情形下的平均使用寿命进行比较,如表2所示.由表2可见, $H$ 越小,平均寿命越长,这是因为 $H$ 越小,复合绝缘子表面由于疏水性能的自然退化引起失效的可能性越小,平均寿命越长.其他参数中, $\lambda$ 越大,平均寿命越短,这是因为 $\lambda$ 越大,外部冲击到达的速率越大,由于外部冲击引起的硬失效的可能性便越大,平均寿命便越短. $\mu_d$ 越大,退化速率越快,加速了复合绝缘子的失效,平均寿命便越短.静态接触角 $\alpha$ 越小,复合绝缘子的表面由疏水性转为亲水性所需的时间便越短,相应地,平均失效时间越短,即平均寿命越短.另外,由表2可见,复合绝缘子的寿命在几年到二十几年,这与工程应用中复合绝缘子的实际寿命是相符的<sup>[24]</sup>.

#### 4 结论

1) 复合绝缘子长期暴露在自然环境中,遭受到多种类型的外部冲击,若只考虑一种类型的外部冲击,对其可靠性评估是不准确的,混合冲击模型是符合实际应用背景的.

2) 复合绝缘子表面疏水性能的自康复过程是复合绝缘子本身具有的一个特性,建立可靠性模型时须根据实际的老化过程充分考虑.

3) 可靠性分析中,复合绝缘子的可靠度和平均使用寿命是复合绝缘子的生产商和电力行业一直关注的可靠性指标,复合绝缘子的寿命在几年到二十几年,这与工程应用中复合绝缘子的实际寿命是相符的.希望本文的研究结果对复合绝缘子的生产、维护和退运提供理论依据.

本文在构建复合绝缘子的老化失效模型中,失效的阈值被假设为常数,事实上,失效的阈值会随着时间改变,硬失效阈值会随着绝缘子状态的变差而变低.为了简化,本文只考虑了失效的阈值为常数的情形,在将来的研究中可将硬失效的阈值随着状态、时间以及环境中温度、湿度、紫外线等因素变化的情形考虑进去.

#### 参考文献(References)

[1] Song W, Shen W W, Zhang G J, et al. Aging characterization of high temperature vulcanized silicone rubber housing material used for outdoor insulation[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2015, 22(2): 961-969.

[2] Lopes I J S, Jayaram S H, Cherney E A. A study of partial discharges from water droplets on a silicone rubber insulating surface[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2001, 8(2): 262-268.

[3] Higashiyama Y, Yanase S, Sugimoto T. DC corona discharge from water droplets on a hydrophobic surface[J]. *Journal of Electrostatics*, 2002, 55(3/4): 351-360.

[4] Vas J V, Thomas M J. Surface degradation of silicone rubber nanocomposites due to DC corona discharge[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2014, 21(3): 1175-1182.

[5] Prasad D S, Reddy B S. Impact of mist and acidic fog on polymer insulator samples exposed to corona discharges[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2016, 23(3): 1546-1554.

[6] 梁英, 张君成, 靳哲. 交流电晕老化对复合绝缘子体积电阻率-温度特性的影响[J]. *高电压技术*, 2016, 42(12): 3875-3880.

(Liang Y, Zhang J C, Jin Z. Characteristics of volume-resistivity and temperature under AC corona for composite insulators[J]. *High Voltage Engineering*, 2016, 42(12): 3875-3880.)

[7] 屠幼萍, 王倩, 李敏, 等. 臭氧浓度对HTV硅橡胶材料的老化作用[J]. *电工技术学报*, 2013, 28(1): 21-28.

(Tu Y P, Wang Q, Li M, et al. Influence of ozone concentration on deterioration of HTV silicon rubber[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2013, 28(1): 21-28.)

[8] 覃永雄, 虞澜, 傅佳, 等. 长波紫外照射下高温硫化硅橡胶的微观物性及憎水性研究[J]. *电工技术学报*, 2014, 29(12): 242-250.

(Qin Y X, Yu L, Fu J, et al. Research on microscopic properties and hydrophobicity of high temperature vulcanization silicone rubber under long-wave ultraviolet radiation[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2014, 29(12): 242-250.)

[9] 梁曦东, 高岩峰, 王家福, 等. 中国硅橡胶复合绝缘子快速发展历程[J]. *高电压技术*, 2016, 42(9): 2888-2896.

(Liang X D, Gao Y F, Wang J F, et al. Rapid development of silicone rubber composite insulator in China[J]. *High Voltage Engineering*, 2016, 42(9): 2888-2896.)

[10] 陈允, 崔博源, 黄常元, 等. 特高压GIL用绝缘子材料寿命试验及预测[J]. *高电压技术*, 2020, 46(12): 4106-4112.

(Chen Y, Cui B Y, Huang C Y, et al. Life test and prediction of insulator materials for UHV GIL[J]. *High Voltage Engineering*, 2020, 46(12): 4106-4112.)

[11] Liu B L, Zhang Z Q, Wen Y Q. Reliability analysis for devices subject to competing failure processes based on chance theory[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2019, 75: 398-413.

[12] 师海燕, 魏淳, 张志强, 等. 双不确定相依竞争失

- 效模型的可靠性评估[J]. 控制与决策, 2022, 37(3): 685-689.
- (Shi H Y, Wei C, Zhang Z Q, et al. Reliability evaluation of dependent competitive failure models with biuncertainty[J]. Control and Decision, 2022, 37(3): 685-689.)
- [13] Parvardeh A, Balakrishnan N. On mixed  $\delta$ -shock models[J]. Statistics & Probability Letters, 2015, 102: 51-60.
- [14] Lorvand H, Nematollahi A R, Poursaeed M H. Assessment of a generalized discrete time mixed  $\delta$ -shock model for the multi-state systems[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2020, 366: 112415.
- [15] Gao H D, Cui L R, Qiu Q G. Reliability modeling for degradation-shock dependence systems with multiple species of shocks[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2019, 185: 133-143.
- [16] Wang X M, Li X G, Lei Q Q, et al. Influence of alternating current corona discharge on the superhydrophobicity of SiO<sub>2</sub>/fluorosilicon resin nano-composite coating[J]. Applied Surface Science, 2019, 478: 642-650.
- [17] Cui L R, Chen Z L, Gao H D. Reliability for systems with self-healing effect under shock models[J]. Quality Technology & Quantitative Management, 2018, 15(5): 551-567.
- [18] Liu H L, Yeh R H, Cai B P. Reliability modeling for dependent competing failure processes of damage self-healing systems[J]. Computers & Industrial Engineering, 2017, 105: 55-62.
- [19] Qi J, Zhou Z, Niu C C, et al. Reliability modeling for humidity sensors subject to multiple dependent competing failure processes with self-recovery[J]. Sensors: Basel, 2018, 18(8): 2714.
- [20] Kong X F, Yang J. Reliability analysis of composite insulators subject to multiple dependent competing failure processes with shock duration and shock damage self-recovery[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2020, 204: 107166.
- [21] Shi H Y, Wei C, Zhang Z Q, et al. The belief reliability analysis of composite insulators with uncertain failure threshold[J]. Applied Mathematical Modelling, 2021, 100: 453-470.
- [22] 茆诗松, 程依明, 濮晓龙. 概率论与数理统计教程[M] 第2版. 北京: 高等教育出版社, 2012: 313-316. (Mao S S, Cheng Y M, Pu X L. Probability theory and mathematical statistics course[M] The 2nd edition. Beijing: Higher Education Press, 2012: 313-316.)
- [23] 朱勇, 郁杰, 刘俊, 等. 交流电晕对复合绝缘子硅橡胶伞裙憎水性的影响研究[J]. 电力科学与工程, 2019, 35(2): 33-37. (Zhu Y, Yu J, Liu J, et al. Study on influence of AC corona on hydrophobicity of silicone rubber shed of composite insulator[J]. Electric Power Science and Engineering, 2019, 35(2): 33-37.)
- [24] 巢亚锋, 王成, 黄福勇, 等. 中国输电线路复合绝缘子运行状况分析[J]. 高压电器, 2015, 51(8): 119-124. (Chao Y F, Wang C, Huang F Y, et al. Assessment on operation state of composite insulators used on Chinese transmission lines[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(8): 119-124.)

### 作者简介

魏淳(1978—), 男, 讲师, 硕士, 从事可靠性理论及应用的研究, E-mail: jsj\_wei@163.com;

师海燕(1982—), 女, 讲师, 硕士, 从事可靠性理论及应用的研究, E-mail: pkshihaiyan@163.com;

张志强(1969—), 男, 副教授, 博士, 从事不确定理论及应用的研究, E-mail: zhangzqhao@126.com;

刘宝亮(1982—), 男, 教授, 博士, 从事可靠性理论及应用的研究, E-mail: baoliang521@163.com;

温艳清(1980—), 女, 副教授, 博士, 从事可靠性理论及应用的研究, E-mail: oryqwen@163.com.

(责任编辑: 魏 冰)