

# 基于 Weibull 函数分布的电力通信网光缆失效率模型

郭思嘉<sup>1</sup>, 赵振东<sup>1</sup>, 张倩宜<sup>2</sup>

(1. 华北电力大学(保定)电气与电子工程学院, 河北 保定 071003;

2. 国网天津市电力公司信息通信公司, 天津 300010)

**摘要:** 为了解决电力通信网可靠性评估过程中光缆可靠性的量化和计算问题, 在现有的三参数 Weibull 分布函数的基础上, 结合光缆现行的国家与电力行业标准和主流生产厂家的光缆特性指标, 提出了光缆失效的3个影响参数——形变参数、结构参数以及时间参数, 并建立了适用于分析电力通信光缆失效率的概率分布模型。针对现有数据的局限性, 采用将传统的黄金分割迭代算法与一种能够近似拟合的最大似然估计法相结合的方法对参数的取值进行计算和估计。该模型较好地反映了不同的因素对光缆可靠性的影响程度, 实例分析验证了该模型具有一定的实用性。

**关键词:** 光缆可靠性; 失效率模型; Weibull 分布; 影响参数; 最大似然估计

## Failure rate model for optical fiber cable in electric power communication network based on Weibull distribution function

GUO Sijia<sup>1</sup>, ZHAO Zhendong<sup>1</sup>, ZHANG Qianyi<sup>2</sup>

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University (Baoding), Baoding 071003, China;

2. Information and Telecommunication Branch, State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300010, China)

**Abstract:** During the process of reliability evaluation in electric power communication network, the main problem lies in quantization and calculation of the reliability of optical fiber cables. In order to solve the problem, a probabilistic distribution model is established in this paper, which is applicable to failure rate analysis of optical fiber cables in electric power communication network, based on existing three-parameter Weibull distribution. By consulting the relevant National and Electric Power Industry Standards and the characteristic indexes given by the main cable manufacturers, three new influence parameters are proposed as deformation parameter, structure parameter and time parameter. Limitations of existing data can be improved by using an algorithm that consulting traditional golden section method and an approximate method for parameters fitting of maximum likelihood estimation, then value ranges of these parameters are calculated. This model can reflect influence of different factors on the reliability of optical fiber cable. Experimental results have proved that this model is practical.

**Key words:** reliability of optical fiber cables; failure rate model; Weibull distribution; influence parameters; maximum likelihood estimation

## 0 引言

电力通信网光缆设备故障和缺陷事故的发生是光缆失效的主要原因, 这些事故的发生往往是多种设备失效的因素随着运行时间的推移不断累积而导致的, 具有随机性和不确定性。从概率和统计的角度对失效事故发生的影响因素进行分析, 建立光缆设备失效概率的计算模型, 是研究光缆可靠性的重要方法之一。

在电力系统中, 通过建模的手段对物理设备或装置进行可靠性分析和计算的例子有很多, 采用的建模方法通常是从研究对象自身影响因素或非研究对象的环境影响因素的角度去考虑。例如文献[1]从输电线在运行中自身疲劳磨损的状态考虑, 建立了结构强度模型和荷载强度模型, 对输电线故障概率进行了计算; 而文献[2]从温度指标等外界环境因素入手, 建立了运行温度条件变化下的时变老化失效率模型, 为分析温度对继电保护装置模块失效率

的实时变化情况提供了途径。此外, 黄宵宁和许瑞等<sup>[3]</sup>的组合预测建模法, 利用模糊化处理法和神经网络法等比较完善的数据处理方法和算法, 建立了输电线的覆冰厚度的组合预测模型, 为分析输电线路的安全性和有效性提供了依据; 李小燕、丁明和齐先军等<sup>[4]</sup>考虑到长距离输电线路各地段的不同天气环境对输电线可靠性的影响, 在分段模拟的基础上引入区间概率的理论对输电线路的元件和线路故障概率进行建模, 揭示了恶劣天气因素对输电系统可靠性的影响程度。而对于电力通信网中光缆设备的失效进行建模分析, 计算相应的失效率和网络的可靠性指标, 主要采用以下两种思路: 从光缆自身的物理结构或者说逻辑功能构成的层面考虑; 从光缆所承载业务的层面进行考虑。基于自身物理结构和逻辑功能构成的建模方法, 将位于固定站点设备之间的完整光缆段等效为单位长度的光缆小段的串联<sup>[5]</sup>, 在每小段的光缆有效性指标趋近于 1, 同时不考虑各小段之间有效性指标差异的条件下, 光缆的失效率可以近似地表达为每小段光缆失效率与光缆长度的乘积。由于每小段光缆所处的外部环境事实上是不同的, 甚至可能使每小段光缆的有效性指标出现较大差异, 这导致该方法的模型误差较大, 实用性并不高。而从光缆承载业务进行分析的建模方法, 采用对光缆发生的缺陷和故障事故可能导致的运行中的业务的影响程度进行量化, 作为衡量光缆失效性的模型指标, 将物理设备的失效率问题转化为承载业务的可靠性问题<sup>[6]</sup>, 抑或是从拓扑结构的视角将通信网络进行分层, 其中光缆抽象为业务传输信息当中的一条链路, 通过研究链路的重要性来计算这条链路的可靠性指标<sup>[7]</sup>。这一类方法能够从一定角度反映出光缆的失效情况, 但是作为光缆失效主要原因的人为破坏因素的影响, 并不能得到很好地体现。然而, 针对专属于电力系统的电力通信专网, 从 Weibull 分布函数的角度进行建模分析的方法, 在研究光缆等电力通信设备的失效性的过程中, 打破了传统电力系统装置和设备失效率恒定的假设, 体现出设备在运行过程中可靠性时变的实际情况<sup>[8-9]</sup>, 并且由于电力设备在投运初期不存在因自身寿命因素而失效的特点<sup>[8]</sup>, 相较于二参数的 Weibull 分布而言, 三参数 Weibull 分布更加符合电力通信光缆的实际运行情况和要求。

本文将广泛应用于各种机械类和电子类产品的失效和可靠性分析的概率分布函数——Weibull 分布函数引入到电力通信网光缆可靠性的建模中, 并进行了改进。结合现有相关的光缆标准和产品特性指标, 提出了 3 个新的失效率的影响因素, 使该分

布函数更加切合电力通信网的运行实际, 能够更好地体现光缆失效的随机性; 模型参数的确定基于大量的现场运行统计数据, 采用最大似然估计的数值算法, 对 3 个参数的取值和误差范围进行了估计。

## 1 Weibull 分布函数的基本概念和定义

韦伯分布(Weibull Distribution), 又称为韦氏分布或韦布尔分布, 是一种连续型随机变量的概率分布, 尤其是在表现大量的实际现象的概率行为时, 它作为一种失效模型能够分析不同类型系统的可靠性, 是一种极其重要的概率分布形式<sup>[10]</sup>。Weibull 分布的基本表达形式如式(1)所示。

$$f(x; \lambda, k) = \begin{cases} \frac{k}{\lambda} \left(\frac{x}{\lambda}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k\right], & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $f(x; \lambda, k)$  是概率密度函数, 自变量  $x$  是一个连续型的随机变量,  $\lambda$  称为尺度参数或比例参数(scale parameter), 定义区间  $\lambda > 0$ ,  $k$  称为形状参数(shape parameter), 定义区间  $k > 0$ 。

如果需要考虑研究对象所处环境位置等相关因素对失效率的影响, 则引入位置参数(location parameter)  $x_0$ , 韦伯分布变为三参数的情况, 在进行失效率分析时一般在自变量  $x \geq x_0$  的情况下进行考虑, 则三参数的韦伯分布函数表达形式如下。

概率密度函数为

$$f(x; \lambda, k, x_0) = \frac{k}{\lambda^k} (x - x_0)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{x - x_0}{\lambda}\right)^k\right], x \geq x_0 \quad (2)$$

分布函数为

$$F(x; \lambda, k, x_0) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x - x_0}{\lambda}\right)^k\right] \quad (3)$$

式中:  $x$  仍然代表自变量;  $\lambda$  是尺度参数;  $k$  是形状参数;  $x_0$  表示方位影响因素的位置参数。

在尺度参数  $\lambda$ 、形状参数  $k$  与位置参数  $x_0$  的取值确定的情况下, Weibull 分布的函数表达式实际上是一个自变量  $x$  的一元函数, 但是如果在 3 个参数值未知的条件下引用 Weibull 分布的表达式, 则是一个与自变量和所有参数变量都相关的多元函数。

## 2 电力通信网光缆失效率模型

### 2.1 光缆失效模型的函数表达形式

参考文献[11-12]等国家和行业标准的相关内容, 将电力通信网传输过程中两类最常见类型的光缆, 即全介质自承式光缆(All Dielectric Self-supporting

Optical Fiber Cable, ADSS)和光纤复合架空地线(Optical Fiber Composite Overhead Ground Wires, OPGW)作为研究对象,从光缆的机械物理特性、光缆所处的环境特性(包括自然环境和人为环境特性)以及光缆产品自身的型号和结构特征中提取和概括出合适的特性指标,对现有三参数 Weibull 分布函数加以改进,提出本文所建立的光缆失效率分布函数模型如下。

概率密度函数为

$$f(t; d, c, t_0) = \frac{c}{d^c} (t - t_0)^{c-1} \exp \left[ - \left( \frac{t - t_0}{d} \right)^c \right] \quad (4)$$

分布函数为

$$F(t; d, c, t_0) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{t - t_0}{d} \right)^c \right] \quad (5)$$

该模型的 3 个参数,分别称为电力通信网中光缆设备的形变参数  $d$  (deformation parameter)、结构参数  $c$  (structure parameter) 和时间参数  $t_0$  (time parameter), 这些参数与众多可能导致光缆失效的影响因素有关,包括光缆本身的特性参数以及光缆所处环境的特性和影响因素。

### 2.2 光缆失效率模型参数的含义

光缆失效概率分布的函数模型中 3 个参数的确定,来源于对影响光缆设备失效事故产生的众多因素的概括。这些因素既包括导致光缆自身发生失效的内因,例如光缆自身结构的逐渐老化,不断传输过程中光缆自身的衰减损耗,光缆应力疲劳导致的开裂甚至拉断等;又包括环境侵蚀、自然灾害和人为破坏等外部因素。

形变参数  $d$  表现的是光缆受机械性外力后发生形变的参数,具体来说是光缆在受到拉伸、挤压等外部冲击力时抵抗外形变化的能力的参数。主要与光缆的芯数、自重、光缆的额定抗拉强度和允许承受压力等特性和指标有关。

结构参数  $c$  表现的是光缆在所处环境的外部条件,特别是所处环境的温度改变时,光缆的表面和内部结构变化的相对程度的参数(比如光缆的金属绞线受热膨胀,纤芯光纤随温度变化产生额外衰减等等),主要与光缆的芯数、自重、光缆两端的电压强弱以及光缆的线膨胀系数等特性和指标有关。

时间参数  $t_0$  表现的是从光缆在开始投运算起,到受到所处环境因素和人为外部因素的影响(比如光缆处于常年有风的环境中长期作疲劳运动;光缆受雷电打击表面产生电痕;光缆受到人为外力事故产生裂痕等)开始出现裂纹、电痕等老化痕迹的损耗现象的这段时间,即作为研究对象的电力通信网光

缆,从投运开始,所有光缆段均未发生上述这些失效现象的持续时间。

### 2.3 参数取值与光缆主要特性的关系

光缆的性能指标与光缆的类型有关,由于普通光缆已经逐渐被代替,针对本文所研究的两类电力通信网所主要使用的 ADSS 和 OPGW 光缆,无论是哪一种,光缆的芯数和自重与光缆的形变参数和结构参数都有关。对于同一类光缆来说,光缆芯数越多,自重越大,形变参数  $d$  的值就越大。光缆的额定抗拉强度、允许承受压力与形变参数  $d$  的关系如表 1 所示。

表 1 光缆的额定抗拉强度、允许承受压力与形变参数  $d$  的关系表

Table 1 Relationship table between rated tensile strength or allowable pressure of optical fiber cable and deformation parameter

光缆特性	指标区间	指标变化等级
额定抗拉强度(=额定拉断力)RTS	$F \geq 50 \text{ kN}$ $40 \text{ kN} \leq F < 50 \text{ kN}$ $35 \text{ kN} \leq F < 40 \text{ kN}$ $30 \text{ kN} \leq F < 35 \text{ kN}$	强 较强 中 低
ADSS	有内垫层 $\geq 2200 \text{ N}/100 \text{ mm}$	如果满足指标条件,则 $d$ 值较大,反之较小
	无内垫层 $\geq 1000 \text{ N}/100 \text{ mm}$	
允许承受压力	无明显光衰减 $\geq 0.4 \text{ RTS}$ OPGW 光衰减小于 $0.05 \text{ dB}$ $\geq 0.6 \text{ RTS}$	

光缆的线膨胀系数与结构参数的关系如表 2 所示。

表 2 光缆的线膨胀系数与结构参数  $c$  的关系表

Table 2 Relationship table between linear expansion coefficient of optical fiber cable and structure parameter

光缆特性	指标区间	指标变化等级
ADSS	$1.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \leq \alpha 1 < 2.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$	小 大
	$2.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \leq \alpha 1 < 3.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$	一般 较大
	$3.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \leq \alpha 1 < 4.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$	较大 中
OPGW	$\alpha 1 \geq 4.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$	大 较小
	$12.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \leq \alpha 1 < 14.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$	小 较大
	$14.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \leq \alpha 1 < 16.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$	一般 中
	$16.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \leq \alpha 1 < 18.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$	较大 小
	$\alpha 1 \geq 19 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$	大 很小

而时间参数  $t_0$  的取值受到光缆类型和光缆不同产品的结构的影响,主要与该光缆所架设运行的位置及环境有关。例如,架设在城区的光缆一般要比

架设在农村的光缆的  $t_0$  值要小, 因为在城区的光缆受到人为事故而发生损耗甚至断裂的概率要大很多; 另外, 一些架设在特殊地理环境当中的光缆的时间参数也要小于时间参数的平均值, 比如在多雷电天气的山区等容易发生极端恶劣天气的地区, 出现受风疲劳振动、潮湿电化腐蚀等老化因素的概率较大, 因此就会在投运后更短的时间内出现老化的痕迹。

### 3 参数取值的确定

#### 3.1 光缆失效率模型参数取值的确定

在模型的函数表达形式被提出的前提下, 如何合理地给出其中的 3 个影响参数的准确取值、取值的范围和误差或是取值的概率分布情况, 成为该模型能否从理论提出到完整地建立和应用的关键。

根据大量的可靠性和安全风险性分析建模的研究经验, 其模型中参数的取值往往来源于系统运行维护过程中的现场记录、相关专家的经验判断、相关文献资料的统计, 或是来源于基于这些数据的某些数学统计方法的处理结果。但是由于现有的上述来源数据的局限性, 很难从中直接得到满足三参数 Weibull 分布的较为准确的参数取值。

本文将现有的一些电力通信网传输过程中实际运行的统计数据作为样本, 采用最大似然估计的参数估计方法, 对满足三参数 Weibull 分布的参数值进行估计。

由式(4)可得本文提出的光缆失效率模型的最大似然函数为

$$L(t; d, c, t_0) = \prod_{i=1}^n \left\{ \frac{c}{d} \left( \frac{t_i - t_0}{d} \right)^{c-1} \exp \left[ - \left( \frac{t_i - t_0}{d} \right)^c \right] \right\} \quad (6)$$

确定 3 个参数的取值, 需要对以下似然函数方程组进行求解:

$$\begin{cases} -\frac{nc}{d} + \frac{c}{d} \sum_{i=1}^n \left( \frac{t_i - t_0}{d} \right)^c = 0 \\ \frac{n}{c} + \sum_{i=1}^n \ln(t_i - t_0) - n \ln d - \sum_{i=1}^n \left( \frac{t_i - t_0}{d} \right)^c \ln \left( \frac{t_i - t_0}{d} \right) = 0 \\ \frac{c}{d^c} \sum_{i=1}^n (t_i - t_0)^{c-1} - (c-1) \sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{t_i - t_0} \right) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

参考文献[10, 13]所给出的解决方法, 将其中的形变参数  $d$  和结构参数  $c$  分别看作时间参数  $t_0$  的复合函数, 通过简单迭代过程 (Simple Iterative Procedure, SIP)<sup>[10]</sup> 得到  $d(t_0)$  和  $c(t_0)$  的函数表达式

后, 方程组(7)可以等价于

$$G(t_0) = \frac{c(t_0)}{d(t_0)^{c(t_0)}} \sum_{i=1}^n (t_i - t_0)^{c(t_0)-1} - \sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{t_i - t_0} \right) = 0 \quad (8)$$

#### 3.2 最大似然函数估计下的参数值的求解方法

由于式(7)构成了一个非线性的超越方程组, 目前没有现存的方法能够求出它们的解析解<sup>[10]</sup>, 本文利用一种能够进行近似拟合的二分法迭代算法<sup>[14]</sup>与传统的黄金分割迭代算法<sup>[10]</sup>相结合, 求解出似然方程组的数值解, 并将其作为 3 个影响参数的估计值。求解过程的主要步骤如下。

**Step1** 确定时间参数  $t_0$  的取值范围, 以便于缩小  $t_0$  的估值范围, 简化算法的复杂程度,  $t_0$  的取值范围满足  $t_0 \in [A, B]$ , 其中

$$\begin{aligned} A &= 2 \min t_i - \max t_i \quad (1 \leq i \leq n) \\ B &= \min t_i \end{aligned} \quad (9)$$

式中:  $A$  和  $B$  分别代表由样本数据所算得的时间参数取值范围的最小值和最大值;  $t_i$  表示  $n$  组样本数据当中任意第  $i$  组数据的光缆的实际运行时间。

**Step2** 确定进行迭代的次数  $N$  以确保整个迭代过程的收敛性, 在拟达到的收敛级数的条件误差限  $\sigma$  的范围内, 算法的迭代次数  $N$  必须满足式(10)。

$$0.5^N (B - A) \leq \sigma \quad (10)$$

式中:  $\sigma$  代表收敛误差;  $N$  是满足不等式的最小正整数。

**Step3** 为保证时间参数  $t_0$  是存在且唯一的, 根据相关文献中对  $t_0$  可能的取值范围的置信度的计算结果<sup>[10]</sup>, 确定所需样本数据的组数, 使得在进行迭代计算时, 时间参数  $t_0$  在该范围内取得最大似然估计值具有较高的可信程度, 如表 3 所示。

根据对现有的现场运行数据的收集、统计和筛选情况, 本文选取  $n = 25$  组数据作为光缆失效率建模的样本数据, 在对结构参数  $c$  的取值进行大致估算后, 可以确定置信度能达 0.97 以上。

**Step4** 在满足 step1 给出的取值范围以及 step3 所选取的样本数据和相应的可信度的条件下, 利用二分法<sup>[13]</sup>对似然方程组的等价表达式(8)进行迭代计算。取偏差值  $\varepsilon = 0.001$ , 当迭代次数达到  $N$  次, 此后的每一次迭代过程中, 若  $t_0$  的取值满足式(8)中  $|G(t_0)| \leq \varepsilon = 0.001$ , 迭代过程停止, 该取值就是时间参数  $t_0$  的最大似然估计值。

表 3 在对应的样本数据组数  $n$  和结构参数  $c$  的取值的条件下, 时间参数  $t_0$  落在区间  $[A, B]$  上的概率表  
Table 3 Probability table of time parameter's value in range  $[A, B]$  on the condition that sets number of sample data and value of structure parameter are corresponding

$c$	样本数据组数 $n$							
	25	50	75	100	125	150	175	200
1.0	1	1	1	1	1	1	1	1
1.5	1	1	1	1	1	1	1	1
2.0	1	1	1	1	1	1	1	1
2.5	1	1	1	1	1	1	1	1
3.0	1	1	1	1	1	1	1	1
3.5	0.999	1	1	1	1	1	1	1
4.0	0.993	1	1	1	1	1	1	1
4.5	0.974	1	1	1	1	1	1	1
5.0	0.93	0.997	1	1	1	1	1	1
5.5	0.855	0.987	0.999	1	1	1	1	1
6.0	0.751	0.958	0.994	0.999	1	1	1	1
6.5	0.632	0.9	0.975	0.994	0.999	1	1	1
7.0	0.511	0.809	0.93	0.975	0.991	0.997	0.999	1
7.5	0.399	0.695	0.853	0.931	0.968	0.986	0.993	0.997
8.0	0.304	0.572	0.747	0.854	0.917	0.953	0.974	0.985

Step 5 在  $t_0$  确定的条件下, 根据简单迭代过程 (SIP) 中得到的  $d(t_0)$  和  $c(t_0)$  的表达式计算出对应的形变参数  $d$  和结构参数  $c$  的最大似然估计值。

### 3.3 光缆失效率模型的建立

由于根据各地区电力通信网运行维护报告中的数据, 受到诸多现场因素的影响, 通过理想的迭代计算得到的时间参数  $t_0$  的数据, 与现实情况的出入较大。

光缆产品在出厂前, 一般都需要经过相应的测试和老化处理, 使其在正式投入使用之后, 较快地就能够进入产品的偶然失效期。在这个阶段, 光缆的失效率低且变化不大, 传输性能稳定且良好, 导致失效的原因往往是外部环境、人为活动等偶然因素。随着运行时间的推移, 在偶然失效的中后期, 光缆的疲劳因素不断积累同时损耗不断增加, 开始逐渐出现损耗的痕迹, 并且随着运行时间进一步延长而快速增加。

相关文献资料显示, 光缆的设计使用寿命通常为 25~30 年, 其中 OPGW 光缆一般为 25~30 年, ADSS 光缆一般为 20~25 年。在相同的使用环境条件下, OPGW 和 ADSS 光缆使用寿命的期望值一般近似为 5:4。一般来说, 光缆的偶然失效期长度为 15~18 年, 根据江苏通光和中天等生产厂家的产品客户反馈调查当中的统计, OPGW 光缆大多在使用 5~8 年后出现中断故障维修的记录, 对于 ADSS 光

缆, 这项数据大多集中在 4~6 年。综上所述, 本文做如下近似假设: 对于光纤复合架空地线(OPGW), 其时间参数  $t_0$  取 6 年, 对全介质自承式光缆(ADSS) 取 4.8 年。

基于本文前面提到过的  $t_0$  受到光缆类型的影响, 通过以上求解方法, 对所选样本数据进行处理后, 进一步估算出 OPGW 光缆和 ADSS 光缆失效率模型的 3 个参数的取值, 结果分别如表 4、表 5 所示。

根据以上数据的统计和计算, 分别对于 OPGW 光缆和 ADSS 光缆, 将形变参数和结构参数取算数平均值, 结果如下。

OPGW 光缆:

$$d = 604.790 \quad c = 4.594$$

ADSS 光缆:

$$d = 603.814 \quad c = 4.586$$

将参数值分别代入式(4)和式(5)即可求得不同光缆的失效率计算模型。

## 4 实例分析

本文随机从某地区 2015 年度的电力通信网中选取 30 条骨干光缆线路, 对其相关的特性数据, 采用了如 3.2 节所示方法的步骤进行了汇总和计算, 最终得到光缆的失效率分布曲线如图 1 所示。

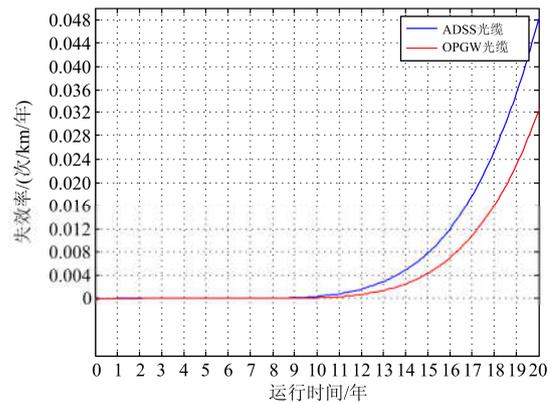


图 1 某地区电力通信网光缆失效率分布曲线图

Fig. 1 Failure rate distribution curves of optical fiber cables in electric power communication network of given area

由图 1 可以看出, 在光缆投运的初期几年, 光缆的失效事件极少, 失效往往是自身质量缺陷、极恶劣的环境条件或者人为的错误操作和使用等偶然事件引起的, 与光缆自身的应力特性、结构和敷设方式等影响因素无关, 从而导致无论是 OPGW 光缆还是 ADSS 光缆, 失效率都处于极低水平。随着光缆运行时间的不断增加, 各种影响因素不断累积, 影响光缆失效率的 3 个参数的取值发生变化: 光缆疲劳度增加, 抗形变能力下降; 光缆受温度变化和

电化等侵蚀的影响日益加剧, 结构变化程度增大, 光缆自身老化失效因素凸显, 使得光缆的失效率快速升高。同时由于实际情况中外力的损耗甚至破坏是光缆失效的重要原因, 相较于采用芳纶纱等绝缘材料制造的 ADSS 光缆, 采用金属管主体结构和金属绞线铠装的 OPGW 光缆具有更加强大的抗外力冲击的能力, 因此在光缆运行时间超过时间阈值  $t_0$  后, OPGW 光缆的失效率往往要低于 ADSS 光缆的失效率。

同时, 实际生产中通常采取高温加电老化和温度循环的方法进行筛选, 使光缆等光器件能够尽快达到允许失效率的标准, 进入相对稳定的偶然失效期<sup>[15]</sup>, 因此电力通信网光缆失效率分布曲线符合工业产品失效的“浴盆曲线”的普遍规律, 曲线上的每个点都代表光缆处于运行时间  $t$  时刻的瞬时失效率的值。该方法能够较好地体现光缆运行当中失效过程的时变性和随机性, 具有一定的实用性和现实指导意义。

表 4 基于不同地区来源的电力通信网 OPGW 光缆运行数据及其相应的失效率模型参数统计表  
Table 4 Parameter values table of failure rate model based on data of OPGW cables in operation from electric power communication networks in different areas

光缆线路(xx 变电站-xx 变电站)	光缆类型	投运日期(年.月)	时间参数	实际运行时间/年	形变参数 $d$	结构参数 $c$
$A_1 - T$	OPGW	2002.10	6	9.167	605.082	4.596
$A_2 - L$	OPGW	2002.03	6	9.75	604.477	4.592
$A_2 - W$	OPGW	2003.08	6	8.333	605.948	4.603
$B - D$	OPGW	2005.10	6	10.167	604.071	4.588
$E_1 - S$	OPGW	2002.09	6	9.25	604.996	4.596
$E_3 - H$	OPGW	2005.05	6	10.583	603.640	4.585
$E_3 - I_1$	OPGW	2000.06	6	11.5	602.661	4.578
$F - I_1$	OPGW	2002.06	6	9.5	604.737	4.594
$I_1 - R$	OPGW	2002.06	6	9.5	604.737	4.594
$I_2 - E_2$	OPGW	2007.09	6	8.278	606.032	4.603
$K - E_1$	OPGW	2008.03	6	7.805	606.523	4.607
$L - N$	OPGW	2006.04	6	9.667	604.590	4.592
$P - Q_2$	OPGW	2009.09	6	6.292	608.093	4.619
$P - R$	OPGW	2003.03	6	8.75	605.515	4.600
$P - M$	OPGW	2008.01	6	7.917	606.406	4.606
$Q_1 - E_4$	OPGW	2002.03	6	9.75	604.477	4.592
$Q_1 - U$	OPGW	2007.05	6	8.583	605.715	4.601
$S_1 - V$	OPGW	2004.02	6	11.833	602.343	4.575
$T - W$	OPGW	2007.08	6	8.358	605.949	4.603
$W - R$	OPGW	2007.05	6	8.667	605.628	4.600
$W - S_1$	OPGW	2004.12	6	11.000	603.207	4.582
$Y - E_2$	OPGW	2007.03	6	8.833	605.456	4.599
$Y - Z_2$	OPGW	2000.10	6	15.167	598.883	4.548
$Z_1 - S_1$	OPGW	2005.04	6	10.667	603.553	4.584
$Z_2 - S_1$	OPGW	2003.09	6	8.25	606.034	4.604

表 5 基于不同地区来源的电力通信网 ADSS 光缆运行数据及其相应的失效率模型参数统计表  
Table 5 Parameter values table of failure rate model based on data of ADSS cables in operation from electric power communication networks in different areas

光缆线路(xx 变电站-xx 变电站)	光缆类型	投运日期(年.月)	时间参数	实际运行时间/年	形变参数 $d$	结构参数 $c$
$A_1 - B$	ADSS	2000.08	4.8	11.333	601.589	4.569
$A_1 - C$	ADSS	2000.11	4.8	11.083	601.849	4.571
$A_1 - T$	ADSS	2009.05	4.8	6.583	606.546	4.607
$A_2 - W$	ADSS	2001.10	4.8	14.167	598.675	4.547
$D - E_1$	ADSS	2000.12	4.8	11	601.935	4.572
$D - E_2$	ADSS	2003.04	4.8	8.667	604.356	4.591
$E_1 - O$	ADSS	2004.11	4.8	7.083	606.000	4.603
$E_3 - I_1$	ADSS	2008.03	4.8	7.75	605.335	4.598
$F - E_1$	ADSS	2002.03	4.8	9.75	603.232	4.582
$G - H$	ADSS	2002.09	4.8	9.25	603.751	4.586
$I_1 - J$	ADSS	2002.11	4.8	9.083	603.924	4.587
$I_2 - N$	ADSS	2004.09	4.8	7.25	605.826	4.602
$K - H$	ADSS	2003.03	4.8	8.75	604.270	4.590
$L - H$	ADSS	2003.12	4.8	8	605.048	4.596
$L - M$	ADSS	2003.10	4.8	8.167	604.875	4.595
$L - V$	ADSS	2004.09	4.8	7.25	605.826	4.602
$M - I_2$	ADSS	2007.10	4.8	8.208	604.859	4.594
$N - Q_1$	ADSS	2001.09	4.8	14.192	598.649	4.547
$N - Q_2$	ADSS	2005.03	4.8	10.708	602.265	4.574
$P - L$	ADSS	2003.06	4.8	8.5	604.529	4.592
$P - V$	ADSS	2010.05	4.8	5.583	607.583	4.615
$Q_1 - R$	ADSS	2008.08	4.8	7.358	605.741	4.601
$R - G$	ADSS	2007.04	4.8	8.692	604.357	4.591
$R - S_2$	ADSS	2003.10	4.8	12.167	600.751	4.563
$S_2 - T$	ADSS	2002.11	4.8	13.083	599.800	4.555
$U - G$	ADSS	2004.04	4.8	7.667	605.394	4.599
$U - Z_2$	ADSS	2005.06	4.8	10.5	602.481	4.576
$X_1 - Y$	ADSS	2010.09	4.8	5.333	607.843	4.617
$X_2 - Y$	ADSS	2006.04	4.8	9.667	603.345	4.583
$Y - Z_1$	ADSS	2006.09	4.8	9.25	603.778	4.586

## 5 结论

(1) 针对电力通信网可靠性分析过程中,在物理设备层面进行有效性建模过程中出现的量化和计算问题,将三参数 Weibull 分布应用于光缆失效率模型的建立,改进原有的函数表达形式并提出适用于电力通信光缆的 3 个影响参数,以更好地体现光缆有效性当中所包含的随机性和不确定性,同时在一定程度上提高了可靠性分析的准确度。

(2) 本文方法对于可靠性分析过程中,在设备层面由于材料磨损、应力疲劳等随时间累积的因素导

致的失效有较好的体现,同时又能兼顾环境和人为等外因造成的影响。实际的算例结果表明,该模型实用有效,具有一定的工程实用价值。

(3) 如何能够对样本数据进行先行的处理或者采用更精确更贴合实际的数学估算方法,使得 3 个参数的理论估算与其实际内涵结合得更加紧密,从而进一步提高模型的精度是该模型的发展方向。

## 参考文献

- [1] 赵渊,魏亚楠,范飞,等. 计及微振磨损与风雨荷载的输电线可靠性建模[J]. 电力系统保护与控制, 2015,

- 43(2): 19-25.
- ZHAO Yuan, WEI Yanan, FAN Fei, et al. Reliability modeling for transmission lines incorporating fretting under strong wind and rain loads[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(2): 19-25.
- [2] 师元康, 姜振超, 赵书涛. 基于内部温度的继电保护装置时变失效率研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(4): 123-128.
- SHI Yuankang, JIANG Zhenchao, ZHAO Shutao. Research on time-varying failure rate of protection devices based on internal temperature[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(4): 123-128.
- [3] 黄宵宁, 许瑞, 许家浩. 南方山区线路覆冰在线监测数据特征分析与预测模型研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(23): 111-116.
- HUANG Xiaoning, XU Rui, XU Jiahao. Analysis of the characteristics for on-line monitoring data and research of the forecast model of the line icing in southern mountain area[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(23): 111-116.
- [4] 李小燕, 丁明, 齐先军. 考虑天气因素的输电网可靠性区间评估及其仿射算法[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(16): 8-13.
- LI Xiaoyan, DING Ming, QI Xianjun. Interval reliability evaluation and affine arithmetic of transmission network considering weather factors[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(16): 8-13.
- [5] 高会生. 电力通信网可靠性研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2009.
- GAO Huisheng. Research on reliability of power communication networks[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2009.
- [6] ZHAO Ziyang, LIU Jianming, ZHANG Ruirui, et al. Research of safety and risk assessment technology for power system communication services[C] // IEEE 2010 International Conference on Power System Technology, Hangzhou, China, October 25-28, 2010: 1-7.
- [7] ZHANG Ruirui, ZHAO Ziyang, CHEN Xi. An overall reliability and security assessment architecture for electric power communication network in smart grid[C] // IEEE 2010 International Conference on Power System Technology, Hangzhou, China, October 25-28, 2010: 1-6.
- [8] 薛安成, 罗麟, 景琦, 等. 基于三参数 Weibull 分布的继电保护装置老化失效率估算[J]. *电力系统保护与控制*, 2014, 42(24): 72-78.
- XUE Ancheng, LUO Lin, JING Qi, et al. Research on aging failure rate estimation of protective relay based on three-parameter Weibull distribution[J]. *Power System Protection and Control*, 2014, 42(24): 72-78.
- [9] 周培强, 周孟然, 谢颖, 等. 基于三参数 Weibull 分布的继电保护风险评估可靠性研究[J]. *工矿自动化*, 2016, 42(8): 56-61.
- ZHOU Peiqiang, ZHOU Mengran, XIE Ying, et al. Research of risk assessment reliability of relay protection based on three-parameter Weibull distribution[J]. *Industry and Mine Automation*, 2016, 42(8): 56-61.
- [10] QIAO Hongzhu, CHRIS P T. Estimation of the three parameter Weibull probability distribution[J]. *Mathematics and Computers in Simulation*, 1995, 39(1-2): 173-185.
- [11] 国电通信中心. 全介质自承式光缆: DL/T 788—2001[S]. 北京: 中华人民共和国国家经济贸易委员会, 2001.
- State Grid Communication Center. All dielectric self-supporting optical fiber cable: DL/T 788—2001[S]. Beijing: State Economy & Trade Commission of People's Republic of China, 2001.
- [12] 国电通信中心. 光纤复合架空地线: DL/T 832—2003[S]. 北京: 中华人民共和国国家经济贸易委员会, 2003.
- State Grid Communication Center. Optical fiber composite overhead ground wires: DL/T 832—2003[S]. Beijing: State Economy & Trade Commission of People's Republic of China, 2003.
- [13] 曲延禄, 张程道, 阎书源. 三参数 Weibull 分布的参数估计[J]. *气象学报*, 1987, 45(3): 374-378.
- QU Yanlu, ZHANG Chengdao, YAN Shuyuan. Estimating the parameters for the three-parameter Weibull distribution[J]. *Acta Meteor Sinica*, 1987, 45(3): 374-378.
- [14] 杨丽, 杨瑞成, 王国东. 关于一种三参数 Weibull 分布的参数估计问题的研究[J]. *鲁东大学学报(自然科学版)*, 2011, 27(3): 203-206.
- YANG Li, YANG Ruicheng, WANG Guodong. Research on a parameter estimate problem of three parameter Weibull distribution[J]. *Journal of Ludong University (Natural Science Edition)*, 2011, 27(3): 203-206.
- [15] 陈坚. 光网络可靠性及其相关技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2004.
- CHEN Jian. Research on reliability of optical networks and related technology[D]. Nanjing: Southeast University, 2004.

收稿日期: 2016-08-19; 修回日期: 2017-02-25

作者简介:

郭思嘉(1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力通信网可靠性分析。E-mail: leafsquare@126.com

(编辑 周金梅)