

# 一类基于改进 Weibull 分布模型的 电力电缆寿命评估方法

张铁岩<sup>1</sup>, 王承民<sup>2</sup>, 孙秋野<sup>1</sup>, 张化光<sup>1</sup>

(1. 东北大学信息科学与工程学院, 沈阳 110004; 2. 上海交通大学电子信息  
与电气工程学院电气工程系, 上海 200030)

**[摘要]** 对电缆的剩余寿命进行评估是电缆寿命管理的关键环节, 以往电缆寿命评估的方法中有 Arrhenius 方法和 Weibull 分布模型。对这两种方法分别进行分析, 特别是确定 Arrhenius 模型中激活能的计算, 以及应用 Weibull 分布模型对电缆寿命进行评估。最后以实际电缆的状态监测数据, 对简化的 Arrhenius 模型进行仿真, 说明所提出的方法是有效的。

**[关键词]** 电缆; 寿命评估; Arrhenius 模型; Weibull 分布

**[中图分类号]** TP206; TM247 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2008)10-0042-05

## 1 前言

电力电缆在高电场、高温等恶劣的条件下长期使用, 绝缘材料会产生绝缘性能降低的问题, 它将影响电缆寿命。

对电缆进行寿命管理, 主要的问题不仅是判断电缆的绝缘状态, 还要对电缆的剩余寿命进行评估, 这是寿命管理的关键环节。电缆设计寿命一般约 30 a, 但是随着运行环境的不同, 电缆的剩余寿命可能也不同。

用于进行材料或设备寿命评估的方法通常有两类。一是统计方法, 利用运行中材料或者设备的统计数据来判断剩余寿命, 这类方法需要在整个设备的服役周期内, 不断的跟踪和采集数据, 并判断设备或材料的状态; 二是加速试验方法, 利用实验室条件对待测试品进行加速老化试验, 从而进行寿命评估。相对来说, 由于电气设备的运行周期一般较长, 而且对电缆等设备状态较难评估, 所以第一类方法用的较少。第二类方法虽然成本较高, 但是较为

成熟, 采用也较多。

加速寿命试验的基本思想是利用高应力下的寿命特征去外推正常应力水平下的寿命特征。其关键在于建立寿命特征与应力水平之间的关系, 由此就可以实现外推正常应力水平下寿命特征的目的。这种寿命特征与应力水平之间的关系就是加速模型, 又称加速方程。

加速模型分为数学和物理两种。数学加速模型通常适用于多环境因素的加速寿命试验, 通过寿命特征与应力因素的多项式回归来建立。物理加速模型是通过与失效机理相关的物理原理推导而得到, 其数学表达形式为已知, 只是模型参数待定。因此, 基于物理加速模型的加速寿命试验的基本任务是通过试验对模型参数进行辨识。

在数学加速模型的基础上, 建立电缆老化的物理加速模型, 即认为电缆老化的数学加速模型已经建立, 根据众多的环境和监测数据确定物理加速模型参数。这些数学加速模型, 如 Arrhenius 模型<sup>[1]</sup>、Weibull 分布<sup>[2]</sup>等, 已经建立, 并且被广泛使用<sup>[3-6]</sup>。

**[收稿日期]** 2007-05-17; **修回日期** 2007-11-13

**[基金项目]** “八六三” 高新技术研究和发展计划资助项目(2006AA04Z183); 上海市科学技术委员会科研计划项目(062158017)

**[作者简介]** 张铁岩(1962-), 男, 河北申县人, 沈阳工程技术学院教授, 博士, 主要研究方向为电力系统自动化、故障诊断等

## 2 Arrhenius 模型

### 2.1 基本原理

产品发生特性退化直至失效,是由于构成其物质的原子或分子因化学或物理原因随时间变化而发生了不良的变化(反应)。当这种变化使器件的一些特性发生变化,反应的结果积累到一定的程度时就会发生失效。失效就是产品寿命的终结。所以反应速度越快,失效寿命越短。

1889年,Arrhenius在研究温度对酸催化蔗糖水解转化反应的基础上总结出:某产品的性能退化速率与激活能、温度关系为

$$\frac{\partial M}{\partial t} = A_0 \exp(-\Delta E/(kT)) \quad (1)$$

其中  $M$  为产品某特征值的退化量;  $\partial M/\partial t$  表示在温度  $T$  (热力学温度) 时的退化速率;  $k$  为玻尔兹曼常数;  $A_0$  为常数;  $t$  为反应时间;  $\Delta E$  为失效机理激活能(eV),同一类元器件在同一种失效模式时  $\Delta E$  为常数。

激活能  $\Delta E$  是晶体中晶格点阵上的原子运动到另一点阵或间隙位置时所需的能量,是反映温度应力对产品寿命影响的一种指标,激活能是产品从正常的未失效状态向失效状态转换过程中存在着势垒,如图1所示,  $E$  取最大峰值与正常状态之差,即横坐标上部为正常状态,而横坐标下部为退化状态。激活能越小,产品失效的物理过程越容易进行;激活能越大,加速系数越大,越容易被加速而失效。

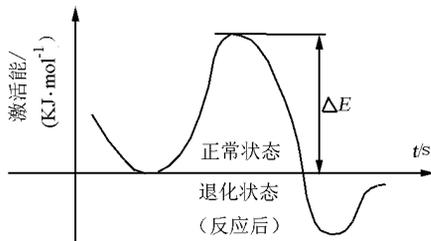


图1 产品失效过程

Fig. 1 The process of product failure

Arrhenius认为,对于某一确定反应来说,激活能是不随温度变化的常数,这就保证了加速寿命试验的可行性。事实上,当温度大于500K时,激活能不再为常数。对于电子产品来说,温度应力一般不会超过500K。

目前,美国对电容器、二极管、微电路、运算放大器、印制电路板、半导体器件、晶体管等元器件的加

速试验给出了激活能。但这些公布的激活能只是在特殊材料、工艺或失效模式等情况下得出的。如何评估一个由不同材料组成的系统的激活能,目前还不能确定。即使是已公布的激活能数值也可能是个误导,这些值在特定的应力或失效模型的情况下是常数,但实际上,激活能会随产品批次的不同和同批不同类的产品而不同。此外,同一产品的不同失效模式也会使激活能发生变化。因此,使用已公布的数值并不一定合适。如果要使用基于先前信息的激活能的数值,那么就必须考虑设计更改所引起的激活能的变化情况。

令元器件初始状态的退化量为  $M_1$ , 对应的时间为  $t_1$ ; 另一种退化量为  $M_2$ , 对应时间为  $t_2$ 。当  $T$  为常数时,从  $t_1$  到  $t_2$  的累计退化量为

$$M_2 - M_1 = \int_{t_1}^{t_2} dm = \int_{t_1}^{t_2} A_0 \exp[-\Delta E/(kT)] dt \quad (2)$$

得

$$M_2 - M_1 = A_0 \exp[-\Delta E/(kT)] (t_2 - t_1) \quad (3)$$

令

$$t = t_2 - t_1 \quad (4)$$

得

$$t = \frac{M_2 - M_1}{A_0} \exp[\Delta E/(kT)] \quad (5)$$

当退化量  $M_2$  达到某个值  $M_p$  时,则认为该器件失效,由此会影响到由它们所构成的设备的性能参数或工作情况。这时的时间差是从时间  $t_1$  开始的延续寿命  $L$ , 即

$$\ln L = \ln \frac{M_p - M_1}{A_0} + \frac{\Delta E}{kT} \quad (6)$$

令

$$A = \ln \frac{M_p - M_1}{A_0}, B = \frac{\Delta E}{k} \quad (7)$$

得

$$\ln L = A + B/T \quad (8)$$

其中  $A, B$  为待定参数。

式(8)是线性化的寿命与温度关系模型,符合化学反应的器件的  $L$  与  $T$  关系。该模型表明,寿命特征的对数是温度倒数的线性函数。

美国对电容器、二极管、微电路、运算放大器、印制电路板、半导体器件、晶体管等元器件的加速试验给出了激活能。但这些公布的激活能只是在特殊材料、工艺或失效模式等情况下得出的。如何评估一个由不同材料组成系统的激活能,目前还不能确定。

即使是已公布的激活能数值也可能是个误导,这些值在特定的应力或失效模型的情况下是常数,但实际上,激活能会随产品批次的不同和同批不同类的产品而不同。此外,同一产品的不同失效模式也会使激活能发生变化。如果要使用基于先前信息的激活能数值,必须考虑设计更改所引起的激活能的变化情况。

### 3 在电缆寿命评估中的应用

原则上, Arrhenius 方程适用于那些简单的、不连续的物理或化学反应。T. W. Dakin 针对绝缘材料损坏这一复杂过程,率先用 Arrhenius 方程来评价和测试<sup>[7, 8]</sup>。

将 Arrhenius 方程用于电缆老化数据的处理,发现预测的寿命比实际的寿命要短,这主要是因为计算中采用电缆的标称温度,而不是实际温度。

#### 3.1 特征值的选择

能够代表电缆绝缘状态的性能参数只能是泄露电流、介质损失正切等参数,这些参数必须是经过处理的、能够反映电缆绝缘状态变化的量,即为实时监测数据长期的趋势变化分量。 $M_p$  值的确定可以从上面的关联分析中得到,也可以根据经验进行确定,当泄露电流或者介质损失正切达到此临界值时,电缆绝缘彻底失效,必须退出运行,并更换电缆。

由上述分析可见,如果采用电缆的标称温度,预测的寿命要比实际寿命短,选择电缆的实际工作温度作为计算时的温度,此温度与性能参数值一一对应,为同一时段的测量数据。

#### 3.2 激活能的计算

对于电缆设备的寿命评估来说,同一类元器件、同一种失效模式的激活能认为是一个常数,可以从电缆的加速老化试验中,根据已有的 Arrhenius 曲线确定。

上述方法有时难以进行。此外,如果在整个电缆服役期间采用同一个激活能常数进行计算可能会产生较大的误差。由式(3)得

$$\ln(M_2 - M_1) = \ln A_0 - \Delta E / (kT) + \ln(t_2 - t_1) \quad (9)$$

由此得到

$$\Delta E = -[\ln(M_2 - M_1) - \ln A_0 - \ln(t_2 - t_1)]kT \quad (10)$$

在计算过程中, $M_2, M_1$  可以为任意选择的 2 个时段的泄露电流或介质损失角测量值,根据此测量

值的退化程度进行激活能的计算。也可以进行多次计算,对得到的激活能再进行数据处理和挖掘,从而选取最合理的激活能。

## 4 Weibull 分布

### 4.1 电缆绝缘击穿的基础理论

有多种方法可以对电缆的寿命进行评估, Weibull 分布是一种描述链形弱点破坏现象的统计理论,即整个产品最薄弱环节破坏,则整个产品失效,电缆产品绝缘的击穿正是弱点击穿。经过大量研究和试验,得出了电缆在一定强度下的击穿几率,从而可以变相地的求出电缆的寿命。采用步进应力加速寿命试验来预测电缆的无故障寿命也是一种被采用的方法。压制成型电缆的击穿分布规律可用二维 Weibull 分布来描述:

$$F(V, t) = 1 - \exp[-c(t/t_0)^a (V/V_0)^b] \quad (11)$$

其中  $F(V, t)$  表示在场强  $V$  作用下经时间  $t$  后的电缆击穿概率, $V$  表示场强, $c$  为系数,由实际数据确定, $a, b$  分别为时间和击穿电压的概率函数的形状参数。在固定时间或固定电压的情况下,可分别得到击穿电压和时间的概率函数分别为

$$F(V) = 1 - \exp[-c(V/V_0)^b] \quad (12)$$

$$F(t) = 1 - \exp[-c(t/t_0)^a] \quad (13)$$

如果取相同的累计击穿概率,可得

$$1 - \exp(-cV^b t^a) = \text{cons} \tan t \quad (14)$$

即

$$Vt^n = \text{cons} \tan t \quad (15)$$

其中  $\text{cons}$  为恒值, $n = a/b$  为电缆的寿命指数。经过模拟电缆的可靠性试验求取  $n$  值,就可以得到任意场强下电缆的寿命。式(15)中电缆击穿场强与时间的关系称为  $V-t$  特性,即迭加电场(击穿电场)随击穿时间基本上成直线降低。

### 4.2 $V-t$ 特性的推广

除了电场场强之外,电缆绝缘的老化与环境因素,如湿度、温度等的依赖性很大,包括温度、湿度的依赖性在内的电缆老化的  $V-t$  特性,采用概率方法,将电缆绝缘击穿的最短时间为

$$\int_0^t \frac{(\gamma V)^n}{D_L} dt = 1 \quad (16)$$

其中  $\gamma = \frac{H - H_1}{100 - H_1}$ ,  $D_L = 115 \times 25.1^n$ ,  $H_1 = 20\% \text{ RH}$

为电缆发生老化时的相对湿度, $H$  为相对湿度。

通过式(16),按照电缆的各系数、运行状态(电

场强度、温度、湿度)所确定的期间,即可推断出产生绝缘击穿时的最短寿命。

电缆击穿寿命指数求取的方法有多种,如恒定电压法、残余电压法、传统的求  $a, b$  参数法及逐级升压累加法等,用这些方法求取电缆寿命指数都是在加速试验的基础上得到的。根据统计规律,采用寿命指数为

$$n = \frac{1\ 250 - 5T}{273 + T} \quad (17)$$

## 5 在线监测电缆剩余寿命的求取

电缆的剩余寿命是一个累加结果,如果外界环境温度过高或者湿度过大,则电缆的剩余寿命要大大缩短。但是,在电缆的服役过程中,环境因素  $T, H$  以及场强  $V$  是不断变化的,是时间  $t$  的函数,所以式(16)实际上为

$$\int_0^t \frac{[\gamma(t)V(t)]^n}{D_L(t)} dt = 1 \quad (18)$$

根据以往的监测数据,可以将电缆的运行周期划分为几个时间段,如按照季节划分,可以分为夏季、冬季等,按照负荷水平分,可以分为大方式、小方式等,如果按照使用的年限划分,则可以分为 5 a, 10 a 等。如果将电缆的服役周期划分成  $M$  段,根据不同的时段,式(18)可以变化为

$$\int_0^{t_1} \frac{[\gamma(t_1)V(t_1)]^n}{D_L(t_1)} dt + \int_{t_1}^{t_2} \frac{[\gamma(t_2)V(t_2)]^n}{D_L(t_2)} dt + \int_{t_2}^{t_3} \frac{[\gamma(t_3)V(t_3)]^n}{D_L(t_3)} dt + \dots + \int_{t_{M-1}}^t \frac{[\gamma(t)V(t)]^n}{D_L(t)} dt = 1 \quad (19)$$

在每一时段中,可以认为参数  $T, H$  以及场强  $V$  都是固定不变的常数,这样可以较准确地得到电缆的剩余寿命。

对于最后一个时段,由于是未发生的状态,还没有监测数据,所以只能采取预测技术,其参数的选取可以参照已经发生的各个时段的参数进行选取。

## 6 仿真分析

几十年来,根据国际上对电缆用高分子材料的试验研究和运行经验,得出电缆在一定工作范围内,热寿命的化学反应大多数情况符合公式

$$\ln \tau = a + b/T \quad (20)$$

式中  $\tau$  为产品在工作温度  $T$  条件下的工作寿命,  $a, b$  为待定系数。

式(20)和式(8)的形式是相同的,已使用了几

十年,在很多情况下验证是有效的。有关国外电站设计规范规定,要求在正常情况下,电力电缆在额定温度长期工作时,其使用寿命达到 40 a 以上,可以用试验验证给予证明。电力电缆的实际使用温度大部分低于额定温度,由加速老化试验得到的试验数据,并应用式(20)推导得到的寿命将具有足够的安全性。

电缆用高分子材料,可用断裂伸长率(绝对值 50 % )或用断裂伸长率保留率(相对值 30 % ~ 50 % )来衡量其热老化程度,并以此来推算热寿命。大多数高分子材料的原始断裂伸长率大于 100 % ,在相同试验实测数据下,用断裂伸长率保留率推算寿命的结果,比使用断裂伸长率更安全。

采用数据挖掘方法来进行寿命预测也是基于以上的经验公式,并进一步添加影响寿命的变量,如电流、电压、介质损失正切、温度、实际使用时间等,以此来提高寿命预测的准确性。具体步骤如下。

1)对实际电缆每间隔一段时间就进行常规的检测,得到的数据用经验公式估算出电缆的寿命;

2)实时监测间隔时间段内通过电缆的电流、电缆两端的电压以及电缆的工作温度,将数据与 Step1 计算所得的评估寿命合并按照如电流、电压、 $\tan \delta$ 、温度、实际使用时间、寿命排列成完整数据;

3)用决策树、关联分析以及关联分析等数据挖掘方法进行分类,寻找寿命与其他变量之间的关系,最终得到一个有别于经验公式而效果不亚于经验公式的新寿命预测方法。

基于一个实际的电缆状态监测数据,采用 SPSS 软件,按照上述步骤对这些数据进行分析,按照式(20)建立多组方程,再采用最小二乘法进行计算,从而得出待定系数  $a$  和  $b$ 。试验温度及线性回归曲线如表 1 及图 2 所示。

表 1 试验温度终止时间

Table1 Terminate time of test temperature

试验温度/℃	180	165	150	135
终止时间/h	75	380	1 000	4 000

由计算结果可得  $a = 2\ 071.562, b = -6.940, n = 4$  时,  $R > 0.95$ ,说明有明显的相关性。

## 7 结语

对电缆的寿命进行评估有很多方法,这些方法基本上都采用标称参数,计算结果不能令人满意。以热寿命的化学反应公式为例,根据实际测量的参

数来对电缆的寿命进行评估,由于实测参数经过了各种技术手段的处理,能够反映电缆工作的实际情况,因此计算结果更加接近于实际值。

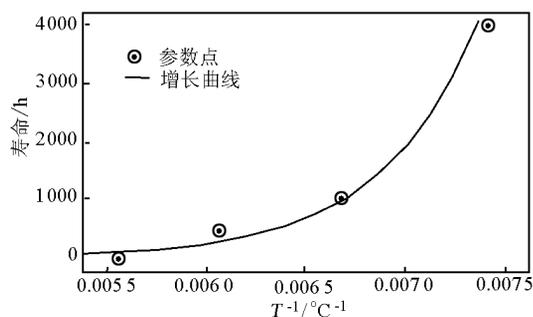


图2 线性回归曲线和所求参数  
Fig. 2 The curve and parameter of linear regression

## 参考文献

- [1] 胡荣祖, 史启桢. 热分析动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2001
- [2] 蒯诗松, 王玲玲, 濮小龙. 威布尔分布场合无失效数据的可靠性分析[J]. 应用概率统计, 1996, 12(1): 95-107
- [3] 李满林. 电力电缆绝缘残余寿命推断[J]. 宁夏电力, 1999, 1: 46-49
- [4] 朱爱荣, 蔡信成, 王建军. 用近似简化法估计 XLPE 绝缘电缆的寿命指数[J]. 电线电缆, 1999, 1: 25-27
- [5] Nelson W. Accelerated life testing - step - stress models and data analysis [J]. IEEE Trans Reliability, 1980, 29(1): 103-108
- [6] 胡恩平, 罗兴柏, 孙福. 采用线性累积模型分析电缆绝缘寿命试验数据[J]. 电子技术应用, 2000, 7: 33-34
- [7] Dakin T W, Electric insulation determination treated as a chemical rate phenomenon [J]. AIEE Trans, 1948, 67: 113-118
- [8] Berberich L J. Guiding principle in the thermal evaluation of electrical insulation [J]. AIEE Trans, 1956, 75(8): 752-761

## The estimation for state of cable based on improved Weibull distribution model

Zhang Tieyan<sup>1</sup>, Wang Chengmin<sup>2</sup>, Sun Qiuye<sup>1</sup>, Zhang Huaguang<sup>1</sup>

(1. School of Information Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 2. School of Electric, Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

[Abstract] The estimation for state of cable is significant to state of cable management. The famous methods for state estimation of cable are Weibull distribution model and Arrhenius method. The two methods are analyzed and researched. A method for measurement of Arrhenius model activation energy is presented. And the Weibull distribution model is used for state estimation of cable. The simulation based on overhaul data, test data and monitor data of the cables for Arrhenius model shows the effectiveness of the approach.

[Key words] cable; state estimation; Arrhenius model; Weibull distribution