

# 基于截断式奇数韦布尔分布族的变压器使用寿命预测

顾心田

国网江苏省电力有限公司超高压分公司 江苏 南京 211100

**摘要:** 电力变压器是整个电力系统中最重要同时也是最昂贵的设备之一。为了有效地规划变压器设备的维护工作以及相关成本支出,企业必须能够准确地预测变压器的使用寿命。尽管标准威布尔分布模型已经在变压器使用寿命预测方面得到了广泛应用,但是在面对危险率非单调或恒定的情况时,这个方法无法得到比较精确的结果。并且由于变压器寿命通常会受到其技术寿命的限制,定义在无限域上的标准分布函数对于模型的拟合会产生偏差。因此本文采用了奇数韦布尔分布模型(the odd Weibull distribution)并且进行了进一步的截断处理,最终通过最大化似然函数的对数来进行参数估计,以便更好地解决单一分布模型在上述情境中的不足。实证研究验证了上述所提模型的适用性。

**关键词:** 寿命预测; 奇数韦布尔分布; 变压器; 截断分布

## 1 引言

电力系统,同时也被称为电网或电力基础设施,是社会稳定运行和发展的关键。作为电力系统中的重要设备之一,电力变压器负责控制电压的升降变换。电力变压器的正常运作对整个系统的电力传输至关重要。一旦电力变压器发生故障,高压电缆将无法正常传输电力,进而导致大规模用户无法正常用电,影响社会正常生活和经济活动。在高压变电站的日常运营中,电力变压器相关的成本支出约占总投入的60%,这使得电力变压器成为电力系统中最昂贵的设备之一。因此,合理管理和维护电力变压器对于电力公司的财务和运营至关重要。如果不能准确预测变压器的使用寿命,可能会导致提前更换变压器,增加不必要的支出。反之,若过度使用老化的变压器,则会增加设备故障的风险,可能导致电力系统突然中断,带来更大的损失和危害。简而言之,电力变压器在电力系统中的重要性及其昂贵的价格要求电力公司必须准确预测其使用寿命,以合理规划变压器的维护工作。只有这样,才能在确保电力系统稳定运行的同时,优化运营成本,提高经济效益。

电力变压器的使用寿命周期管理一直被视作一个非常重要的研究领域。为了能够准确地预测变压器的使用寿命,文献<sup>[1]</sup>中提出了一种基于随机森林的电力变压器使用寿命的预测方法。该方法通过对大量电力变压器数据的降维处理与分析,提取其中影响电力变压器寿命的特征参数,从而预测变压器的使用寿命。文献<sup>[2]</sup>中提出了一种基于马尔可夫转移矩阵的变压器缺陷转移率预测方法,其利用变压器历史缺陷记录,建立韦布尔分布模型拟合得到变压器缺陷转移率,将其应用于马尔可夫状态

转移矩阵中,得到变压器不同状态之间的转移率,并引入了回退因子进行修正;基于该缺陷转移率,通过构建比例故障模型对变压器剩余寿命进行预测。文献<sup>[3]</sup>提出了基于自适应模糊神经网络(ANFIS)的多特征诊断参数的变压器寿命预测和状态评估方法。提取影响变压器寿命的特征参数,通过自适应模糊神经网络对这些特征参数进行学习,利用反向传播算法解决权重的自适应动态调整,构建变压器的寿命预测模型。文献<sup>[4]</sup>利用域适应进行剩余寿命预测,并且通过对特征层与语义层进行调整从而提出了一种新方法。文献<sup>[5]</sup>采用了电力变压器的年度平均净利润的最大值作为判断标准,将修复变压器的年平均净利润与退役变压器的年平均净利润进行比较,以定量预测变压器的经济寿命。文献<sup>[6]</sup>使用最小二乘法和故障率作为设备可靠性评估参数来优化韦布尔分布的参数估计。

在上述研究中,诸如指数分布和韦布尔分布等标准分布常被用于对危险率进行建模。然而,这些分布在拟合具有浴盆型或单峰型危险率的故障率数据时,往往会表现出较差的拟合度。例如,浴盆型危险曲线在中间部分是平坦的,而在两端是单调的,这样的数据如果使用标准韦布尔模型进行建模,得到的预测结果精度偏低。另一个问题是,标准分布一般将定义在无限域上,而电力变压器的实际寿命通常都不会超过其技术寿命。

针对以上问题,本研究提出了一种考虑风险函数变异性和寿命有限性的电力变压器寿命预测方法。该方法充分利用奇数韦布尔分布模型精准拟合各种不同危险率类型,并进一步对定义域进行截断以适应具有各种不同故障率的变压器寿命数据。最终通过对220KV电压等级的电力变压器进行实验,验证了新方法的适用性和效率。

作者电子邮件: 717357006@qq.com

## 2 奇数韦布尔分布模型

在本节中，给出了三参数广义韦布尔分布。该分布支持具有不同形状的危险率函数的电力变压器寿命数据的建模。

### 2.1.1 寿命函数：

$$S_{ow}(t) = \left[ 1 + \left\{ \exp\left(\frac{t}{\theta}\right)^\alpha - 1 \right\}^\beta \right]^{-1}; 0 < t < \infty, 0 < \theta, 0 < \alpha\beta$$

### 2.1.2 概率密度函数

$$f_{ow}(t) = \left(\frac{\alpha\beta}{t}\right) \left(\frac{t}{\theta}\right)^\alpha \exp\left(\frac{t}{\theta}\right)^\alpha \left\{ \exp\left(\frac{t}{\theta}\right)^\alpha - 1 \right\}^{\beta-1} \left[ 1 + \left\{ \exp\left(\frac{t}{\theta}\right)^\alpha - 1 \right\}^\beta \right]^{-2}$$

### 2.1.3 危险函数

$$h_{ow}(t) = \left(\frac{\alpha\beta}{t}\right) \left(\frac{t}{\theta}\right)^\alpha \exp\left(\frac{t}{\theta}\right)^\alpha \left\{ \exp\left(\frac{t}{\theta}\right)^\alpha - 1 \right\}^{\beta-1} \left[ 1 + \left\{ \exp\left(\frac{t}{\theta}\right)^\alpha - 1 \right\}^\beta \right]^{-1}$$

根据文献<sup>[8]</sup>，参数 $\beta$ 实际上是奇数韦布尔分布与标准韦布尔分布之间的对数值：

$$\beta = \frac{\ln \left[ \frac{1 - S_{ow}(t)}{S_{ow}(t)} \right]}{\ln \left[ \frac{1 - S_w(t)}{S_w(t)} \right]}$$

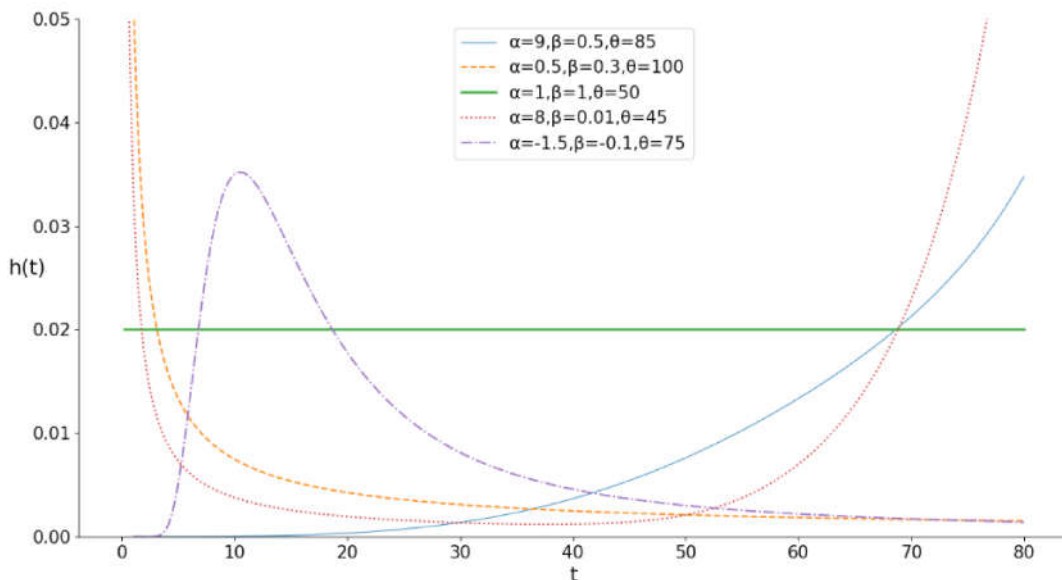
此处 $S_w(t)$ 是标准韦布尔分布的寿命分布函数。显然的是当 $\beta = 1$ 时，奇数韦布尔分布将会退化到标准韦布尔

## 2.1 分布函数

奇数韦布尔分布的寿命函数、概率密度函数和危险函数分别为：

## 2.2 分布函数的性质

通过对危险分布函数设置不同的 $\alpha$ 、 $\beta$ 和 $\theta$ 参数值，可以得到不同形状的危险函数图像。因此解决实际问题时可以对收集的寿命数据的对应的危险函数的图像，对奇数韦布尔分布设置不同的参数值来对不同形状的危险函数进行建模。图一展示了五组不同的参数设置下奇数韦布尔分布危险函数的图像曲线。



图一 奇数韦布尔分布危险函数图像

危险函数的主要形式可能是恒定型、递增型、递减型、浴缸型或单峰型，这些形状由形状参数空间的边界线（如表一所示）分隔开来。

表一 奇数韦布尔分布不同危险函数形状的参数空间

Parameter space	Hazard rate behaviour
$\alpha = 1, \beta = 1$	constant
$\alpha > 1, \alpha\beta > 1$	increasing
$\alpha < 1, \alpha\beta < 1$	decreasing
$\alpha > 1, \alpha\beta \leq 1$	bathtub
$\alpha < 1, \alpha\beta \geq 1$	unimodal

2.3 截断分布

注意到标准韦布尔分布是定义在无限域上的分布，然而，变压器的实际寿命是有限的，且通常不会超过其出厂时的技术设计寿命。因此，我们对韦布尔分布进行截断，截断后的分布函数如下给出：

$$S_{tow}(t) = \frac{S_{ow}(t) - S_{ow}(L)}{1 - S_{ow}(L)}$$

显而易见的是， $S_{tow}(0) = 1$ ，以及  $S_{tow}(L) = 1$ 。

3 参数推断

3.1 截断数据的极大似然估计

首先我们需要得到由已知数据拟合而成的截断奇数韦布尔分布的寿命函数。为了完成这个目标，我们应首先收集一系列同型号的电力变压器的使用寿命数据。对于其中的每一台电力变压器，我们首先应该记录它是否还能够正常工作，用  $\delta_i$  表示。对于已经无法正常工作的样本我们应该记录该电力变压器的实际使用寿命，而对于还能正常工作的样本，我们应该记录它已经工作的时间。最终对每一台变压器样本得到数据样本  $(t_i, \delta_i)$ 。

在收集好样本数据之后，我们使用极大似然估计的方法来估计参数，极大似然函数如下：

$$l(\theta) = \sum_{i=1}^n \delta_i \log[S_{tow}(t_i - 1) - S_{tow}(t_i)] + \sum_{i=1}^n (1 - \delta_i) \log[S_{tow}(t_i)]$$

通过极大似然估计，我们可以得到在预设好寿命函数的  $\alpha, \beta$  下  $\theta$  的无偏估计。

3.2 电力变压器使用寿命以及报废数量的期望预测

考虑到电力公司的实际运营需求，我们不仅希望对每个变压器的使用寿命进行预测，同时我们还希望能够

预测到报废的电力变压器的数量。

对于给定的电力变压器，它的总使用寿命的期望由上述极大似然估计法得到的截断奇数韦布尔分布的寿命函数直接求取期望得到。而对于已经使用了  $Z$  年的电力变压器，对其进行剩余使用寿命预测时，只需在  $T > Z$  的条件限制下，对寿命函数求条件期望后减去已使用的时间即可得到。

为了合理规划电力变压器的维护工作和成本支出，电力公司还希望能够预测出未来某段时间内可能报废的电力变压器的数量。为此，可以通过统计预测剩余寿命在给定时间内的电力变压器的数量，将这个统计值作为可能报废的电力变压器的数量的估计值。

4 实验验证

4.1 数据描述

我们将提出的方法应用于电压等级为 220KV 的电力变压器。这种变压器是当下应用最广泛、最常见的变压器之一。采用国家电网华东分公司自 1980 年到 2022 年对使用的电力变压器的观测数据进行计算分析。在观察期间，共记录了 3237 台电力变压器，其中 391 台已经报废。在报废的电力变压器中，使用最久的一台工作了 44 年，最少的一台工作了 35 年。

4.2 实验结果展示与分析

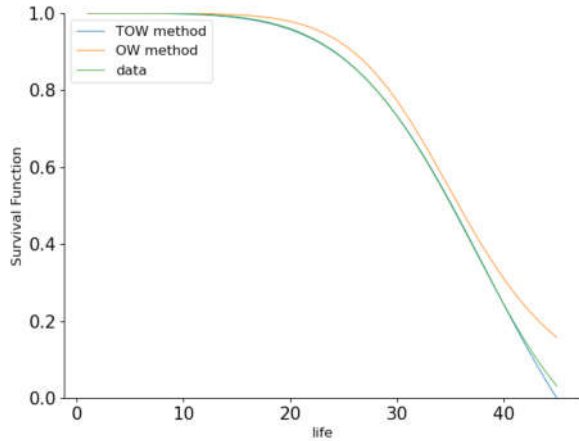
由于危险函数的形状在参数空间内变化，因此当对参数进行估计时，应当对五组不同的初始值逐一进行尝试，以实现给定数据的最佳拟合。值得注意的是，当仅从一组初始值出发对预测函数进行拟合时，无法在预定义的参数空间内搜索到最好的结果。例如，当使用  $\alpha = 9, \beta = 0.7$  作为预设的参数初始值时，整个优化过程将会受到  $\alpha > 1$  以及  $\alpha\beta > 1$  的限制。所有的参数都会被认为最初为正数。

让 TOW 表示具有截断奇数韦布尔分布的模型，并另设 OW 表示原始的奇数韦布尔分布的模型作为比较方法。表二展示了实验的结果。其中最佳拟合的参数结果使用粗体表示。

表二 参数估计结果

Parameter space	TOW			OW		
	$\alpha$	$\lambda$	$\theta$	$\alpha$	$\lambda$	$\theta$
$\alpha = 1, \beta = 1$	1	1	27.94	1	1	50.00
$\alpha > 1, \alpha\beta > 1$	1.00	2.98	78.94	4.46	1.17	35.98
$\alpha < 1, \alpha\beta < 1$	0.04	3.12	79.86	0.35	2.32	22.85
$\alpha > 1, \alpha\beta \leq 1$	1.96	0.01	30.82	1.96	0.42	45.00
$\alpha < 1, \alpha\beta \geq 1$	0.72	4.02	41.84	1.00	3.72	51.25

我们绘制了直接从数据计算得到的寿命经验分布函数，并同时绘制了由TOW与OW两种方法各自得到的寿命函数图像进行对比。如图二中所展示的，TOW方法比OW方法得到的预测函数能够更好地拟合经验分布曲线。



图二 TOW与OW预测曲线的比较

两种基于奇数韦布尔分布的方法被用于预测2022年的电力变压器的报废数量。实际的报废数量为14台，TOW方法预测的结果为16台，而OW方法预测结果为9台，可见TOW方法预测的结果更为精确。这样的结果进一步提升了本文所提出的方法的有效性。

## 5 结语

本文提出了一种全新的用于预测电力变压器的使用寿命的方法，可用于解决实际情况中电力变压器的危险函数图像可能有多个种类，以及电力变压器的实际使用寿命有给定的上限导致的预测结果精度较差的问题。该方法以最基本的韦布尔分布和指数分布作为子模型，采用了奇数韦布尔分布模型，可以从恒定型、递增型、递减型、浴缸型或是单峰型中筛选出最符合实际情况的危

险函数图像类型，并对定义域进行截断，进一步贴合电力变压器实际寿命一般小于技术设计寿命的实际情况。相比于原始的奇数韦布尔分布模型，截断方法提供了更加合理的寿命预测函数和未来一段时间内新产生报废机器数量的更准确的预测结果。未来本研究可以通过将预测变量纳入模型来尝试进一步的优化。研究人员同时也期望将我们的模型应用到不同的样本中，以进一步证明该模型的泛化能力。

## 参考文献

- [1] LIU F, LIU S, GAO X, et al. Research on Transformer Life Forecast Based on Random Forest Algorithm [J]. Journal of Physics:Conference Series, 2021, 1992(4).
- [2] 辛雨,熊炜,袁旭峰,etal.基于马尔可夫状态转移的变压器剩余寿命预测[J].电网与清洁能源,2023,39(5):20-9.
- [3] 胡碧伟,邓祥力,贾声昊.基于ANFIS的变压器寿命预测和状态评估[J].电测与仪表,2022,59(1):61-8.
- [4] LI X, LI J, ZUO L, et al. Domain Adaptive Remaining Useful Life Prediction With Transformer [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 3521213-1--13.
- [5] HU B, CHEN Q, RAO W, et al. Economic Life Prediction of Transformer Based on Repairing Profit and Decommissioning Profit [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1314: 012113-.
- [6] Solari H.S. , Majidi B. , Moazzami M..Optimal estimation of weibull distribution parameters in order to provide preventive-corrective maintenance program for power transformers [J]. Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering, 2019, 15 (4): 536-544.