

文章编号: 1007-2780(2010)02-0205-05

# 威布尔分布下 VFD 恒定应力加速寿命试验与统计分析

张建平, 王睿韬

(上海电力学院 能源与环境工程学院, 上海 200090, E-mail: jpzhanglzu@163.com)

**摘 要:** 为了精确地估计真空荧光显示器(VFD)的可靠性寿命, 节省试验测试时间, 通过建立加速寿命试验模型开展了 4 组恒定应力加速寿命试验, 采用威布尔函数描述 VFD 寿命分布, 利用最小二乘法(LSM)估计威布尔参数, 完成了试验数据的统计分析, 并自行开发了寿命预测软件, 确定了加速寿命方程, 实现了 VFD 的寿命估计。数值结果表明, 试验设计方案是正确可行的, VFD 的寿命服从威布尔分布, 其加速模型符合线性阿伦尼斯方程, 每个加速应力水平下 VFD 的失效机理不变, 精确计算出的 VFD 寿命对其生产厂商和技术人员具有重要的指导意义。

**关 键 词:** 真空荧光显示器; 可靠性寿命; 加速寿命试验; 恒定应力; 威布尔分布

**中图分类号:** TN141; TN102      **文献标识码:** A

## Constant Stress Accelerated Life Tests and Statistical Analysis for VFD under Weibull Distribution Case

ZHANG Jian-ping, WANG Rui-tao

*(School of Thermal Power and Environmental Engineering,**Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China, E-mail: jpzhanglzu@163.com)*

**Abstract:** In order to estimate the reliable lifetime of Vacuum Fluorescent Display (VFD) more accurately, and reduce testing time, four constant stress accelerated life tests (CSALT) were conducted by establishing accelerated life test model. The statistical analysis on test data was achieved by applying the Weibull model to describe the lifetime distribution, and Least Square Method (LSM) to estimate the Weibull parameters. Furthermore, accelerated life equation was determined and self-developed software was employed to predict the VFD lifetime. The numerical results show that test design scheme of CSALT is correct and feasible, that the VFD lifetime follows Weibull distribution, that the life-stress relationship meets linear Arrhenius equation completely, and that the VFD failure mechanism keeps constant at each temperature stress. The proposed methods and the estimated reliable lifetime of VFD can provide some significant guideline to its manufacturers and technicians.

**Key words:** vacuum fluorescent display; reliable lifetime; accelerated life test; constant stress; Weibull distribution

收稿日期: 2008-12-14; 修订日期: 2009-01-05

基金项目: 上海市自然科学基金项目资助(No. 09ZR1413000); 上海市高等学校本科教育高地建设项目; 上海市科委重点科技攻关计划资助(No. 08160510600)

作者简介: 张建平(1972-), 男, 江苏南京人, 教授, 博士后, 主要从事电子器件的寿命可靠性与性能仿真、新能源装置中关键部件的力学行为分析等方面的研究。

## 1 引 言

真空荧光显示器 (Vacuum Fluorescent Display, VFD) 是一种从真空管发展而来的真空显示器件,已经经历了 40 多年的发展历程。从最初的单位数码管发展到目前复杂的笔段、点阵和多色图表显示,广泛应用于消费类电子产品 (DVD、VCD、音响、微波炉和售价系统等)、仪表、汽车等领域<sup>[1,2]</sup>。作为一种高可靠性、长寿命的平板显示器,VFD 的寿命可达数万小时。竞争空前激烈的市场使得 VFD 产品更新换代的速度愈来愈快,而且消费者和特殊应用场合对 VFD 的可靠性寿命要求越来越高<sup>[3]</sup>。因此,迫切需要对 VFD 进行加速寿命试验,以期在短时间内实现 VFD 的寿命预测。

加速寿命试验按照应力施加方式的不同通常分为 3 种类型:恒定应力加速寿命试验、步进应力加速寿命试验、序进应力加速寿命试验(简称恒加、步加、序加试验)。恒定应力加速寿命试验相对于步进应力和序进应力加速寿命试验方法具有以下优点<sup>[4,5]</sup>:

- (1) 试验方法简单,试验设备要求不高;
- (2) 试验理论较为成熟,试验容易取得成功;
- (3) 试验中得到的信息最多,试验结果较为准确。

茆诗松<sup>[6]</sup>采用威布尔分布,对恒加试验数据的数值分析方法进行研究,利用最佳线性无偏估计和简单线性无偏估计得出了各种可靠性指标。对于 VFD,通过恒定与步进应力相结合的加速寿命试验,利用威布尔分布完成了 VFD 寿命的预测<sup>[7]</sup>。虽然恒定与步进应力相结合的加速寿命试验比恒加试验更能缩短试验时间,但是试验过程比较复杂,对试验设备要求较高,所得到的试验数据不够准确,不能够很好地反映 VFD 的寿命信息。因此,本文开展了 4 组恒定应力的加速寿命试验,应用威布尔函数描述 VFD 寿命分布,采用最小二乘法 (Least Square Method, LSM) 估计威布尔分布的形状参数和尺度参数,绘制加速寿命直线,摸清了 VFD 的失效模式及寿命分布,并且自行开发了寿命预测软件,快速、准确地预测了 VFD 寿命,为进一步研究 VFD 的可靠性寿命问题提供了有价值的试验数据和理论依据。

## 2 VFD 加速寿命试验的方案设计

### 2.1 加速应力水平的选择

影响 VFD 寿命的主要因素是其阴极灯丝的温度,因此选择 VFD 灯丝温度(灯丝电压监视)作为加速寿命试验的加速应力。

加速应力水平的选择原则为:最高应力和最低应力之间应有较大间隔,其中一个应力水平应接近或等于该产品技术标准中规定的额定值。最高应力不得大于该产品结构材料、制造工艺所能承受的极限应力,以免带来新的失效机理。VFD 正常工作时的灯丝温度是 650 °C,保持失效机理不变的最高灯丝温度不超过 850 °C。

根据可靠性原理,在进行恒定应力加速寿命试验时,加速应力水平的个数  $l$  不少于 3,最好大于等于 4,故取  $l=4$ 。适当选择应力水平的间隔,确定 4 组温度应力水平分别为:  $T_1=1\ 023.00\text{ K}$ 、 $T_2=1\ 055.56\text{ K}$ 、 $T_3=1\ 087.85\text{ K}$ 、 $T_4=1\ 123.33\text{ K}$ 。该 VFD 产品型号的灯丝正常工作温度为  $T_0=923.95\text{ K}$ ,每个应力水平下投入的试验样品个数为  $n_i=20(i=1,2,3,4)$ 。

### 2.2 失效标准和试验终止时间的确定

根据 VFD 的失效标准(测试位亮度(绿粉)低于最低亮度标准( $350\text{ cd/m}^2$ )的 60%)记录每个试验样品的失效时间。并进行完全寿命试验,直到每个温度应力水平下的试验样品全部失效,试验终止。

## 3 VFD 加速寿命试验的数学模型

### 3.1 加速模型

设 VFD 的加速模型符合阿伦尼斯方程<sup>[8]</sup>,即:特征寿命  $\eta$  与灯丝温度应力  $T$  满足如下的关系式:

$$\ln \eta = \alpha + \beta / T \quad (1)$$

式中:  $\alpha, \beta$  为待估的加速参数,  $T$  为绝对温度(单位:K)。

### 3.2 寿命分布

在可靠性工程中,常见的概率分布有指数分布、正态分布和威布尔分布。其中,威布尔分布在分析半导体、电子元器件以及机械零件的失效分布方面得到了广泛的应用。实践证明:凡是由于某一局部失效或故障引起全局机能失效的元件、器件、设备或系统等的寿命都是服从威布尔分布

的<sup>[9]</sup>。威布尔分布的特点是兼容性好,它对各种类型的数据拟合能力强,可以全面地描述产品不同失效期的失效过程与特征,指数分布、正态分布等都可看作是威布尔分布的特例。因此,设 VFD 的寿命  $T$  服从位置参数  $\gamma=0$  的威布尔分布,其分布函数为:

$$F(t) = 1 - \exp[-(t/\eta)^m], t > 0 \quad (2)$$

式中: $m$  为形状参数; $\eta$  为尺度参数。

### 3.3 威布尔参数估计

整理式(2),并对方程两边取两次对数后可得:

$$\ln \ln [1 - F(t)]^{-1} = m \ln t - m \ln \eta \quad (3)$$

令:

$$\begin{cases} y = \ln \ln [1 - F(t)]^{-1} \\ x = \ln t \\ a = m \\ b = -m \ln \eta \end{cases} \quad (4)$$

则有线性方程:

$$y = ax + b \quad (5)$$

利用恒定应力  $T_i$  的试验数据,将失效时间  $t_j$  按照从小到大的顺序排列,累积失效概率  $F(t_j)$

按以下中位秩公式计算:

$$F(t_j) = \frac{j - 0.3}{n_i + 0.4} \quad j = 1, 2, \dots, n_i \quad (6)$$

因此,得到一组试验数据:

$$(t_j, F(t_j)) \quad j = 1, 2, \dots, n_i \quad (7)$$

根据式(4),则式(7)可转化为:

$$(\ln t_j, \ln \ln [1 - F(t_j)]^{-1}) = (x_j, y_j) \quad (8)$$

采用最小二乘法对式(8)的数据进行直线拟合<sup>[10]</sup>,拟合直线的系数  $a_i, b_i (i = 1, 2, 3, 4)$  分别为:

$$\begin{cases} a_i = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} x_j y_j - (\sum_{j=1}^{n_i} x_j \cdot \sum_{j=1}^{n_i} y_j) / n_i}{\sum_{j=1}^{n_i} x_j^2 - (\sum_{j=1}^{n_i} x_j)^2 / n_i} \\ b_i = \sum_{j=1}^{n_i} y_j / n_i - a_i \cdot \sum_{j=1}^{n_i} x_j / n_i \end{cases} \quad (9)$$

由式(4)、(9)可得应力  $T_i$  下的形状参数  $m_i$ 、尺度参数  $\eta_i$  为:

$$m_i = a_i, \eta_i = \exp(-b_i/a_i) \quad (10)$$

$x_j$  与  $y_j$  的决定系数表达式为:

$$R_i^2 = \frac{[\sum_{j=1}^{n_i} x_j y_j - (\sum_{j=1}^{n_i} x_j \cdot \sum_{j=1}^{n_i} y_j) / n_i]^2}{[\sum_{j=1}^{n_i} x_j^2 - (\sum_{j=1}^{n_i} x_j)^2 / n_i] \cdot [\sum_{j=1}^{n_i} y_j^2 - (\sum_{j=1}^{n_i} y_j)^2 / n_i]} \quad (11)$$

### 3.4 寿命计算

当 VFD 寿命服从威布尔分布时,正常温度应力  $T_0$  下 VFD 的平均寿命  $\mu$  和可靠寿命  $t_R$  计算公式分别为:

$$\mu = \eta_0 \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right), t_R = \eta_0 \left(\ln \frac{1}{R}\right)^{\frac{1}{m}} \quad (12)$$

式中: $\Gamma(\cdot)$  为伽马函数; $R$  为给定的可靠度,一般取值为 0.9; $\eta_0$  为  $T_0$  下寿命估计的尺度参数;形状参数  $m$  可根据 VFD 的失效机理与正常应力

水平  $T_0$  下相同的假定,取加权平均:

$$m = \frac{\sum_{i=1}^4 n_i m_i}{\sum_{i=1}^4 n_i} \quad (13)$$

## 4 试验数据

根据上述所提出的试验设计方案对 VFD 进行恒定应力加速寿命试验,得到 4 组恒定应力水平  $T_i (i = 1, 2, 3, 4)$  下试验样品的失效时间,见表 1。

表 1  $T_1, T_2, T_3, T_4$  恒定应力下试验样品的失效时间

Table 1 Sample failure time of constant-stress tests at  $T_1, T_2, T_3, T_4$

温度应力 (K)	$t_1$ (h)	$t_2$ (h)	$t_3$ (h)	$t_4$ (h)	$t_5$ (h)	$t_6$ (h)	$t_7$ (h)	$t_8$ (h)	$t_9$ (h)	$t_{10}$ (h)
$T_1$	1 509.00	1 553.00	1 591.50	1 597.00	1 602.50	1 641.00	1 657.50	1 663.00	1 668.50	1 685.00
$T_2$	555.33	562.67	570.50	581.00	586.50	596.40	600.80	605.20	609.60	621.33
$T_3$	213.33	220.67	231.67	235.33	239.00	242.67	246.33	253.14	256.29	259.43
$T_4$	74.80	79.20	83.60	93.08	94.77	96.46	104.92	106.62	108.31	111.89

(续表)

温度应力 (K)	$t_{11}$ (h)	$t_{12}$ (h)	$t_{13}$ (h)	$t_{14}$ (h)	$t_{15}$ (h)	$t_{16}$ (h)	$t_{17}$ (h)	$t_{18}$ (h)	$t_{19}$ (h)	$t_{20}$ (h)
$T_1$	1 729.00	1 747.33	1 754.67	1 773.00	1 789.50	1 795.00	1 800.50	1 839.00	1 883.00	2 037.00
$T_2$	628.67	638.75	641.50	644.25	647.00	649.75	652.50	655.25	669.00	713.00
$T_3$	262.57	265.71	268.86	277.50	283.00	288.50	299.50	305.00	310.50	327.00
$T_4$	114.40	118.80	120.10	123.20	127.60	148.85	151.41	151.93	171.94	176.56

### 5 试验数据的统计与分析

由于威布尔分布的参数计算较复杂,所以自行开发了操作简单、计算速度快、精度高、通用性强的 VFD 寿命预测软件。

#### 5.1 形状参数和尺度参数的计算

对表 1 中 4 组恒定应力  $T_i (i=1,2,3,4)$  下的失效数据进行处理,采用最小二乘法分别拟合成直线,绘于图 1,结合式(10)求出各温度应力下的形状参数  $m_i$  和尺度参数  $\eta_i$ ,见表 2。拟合直线的决定系数分别为  $R_1^2=0.9074, R_2^2=0.9368, R_3^2=0.9459, R_4^2=0.9360$ 。

表 2  $T_i$  应力下的  $m_i$  和  $\eta_i$

Table 2 Values of  $m_i$  and  $\eta_i$  at the stress of  $T_i$

应力水平	$T_1=1\ 023.00\text{ K}$	$T_2=1\ 055.56\text{ K}$	$T_3=1\ 087.85\text{ K}$	$T_4=1\ 123.33\text{ K}$
$m_i$	15.54	17.72	9.81	4.63
$\eta_i$	1 772.59	639.60	227.59	128.90

#### 5.2 加速寿命方程

将 4 组恒定应力下的数据点  $(1/T_i, \ln\eta_i) (i=1,2,3,4)$  绘于图 2,同样采用最小二乘法拟合,求解出式(1)的加速参数  $\alpha=-21.91, \beta=30\ 004.94$ ,得到加速寿命方程为:

$$\ln\eta = -21.91 + 30\ 004.94/T \quad (14)$$

加速寿命曲线即 VFD 寿命特征图如图 2 所示,

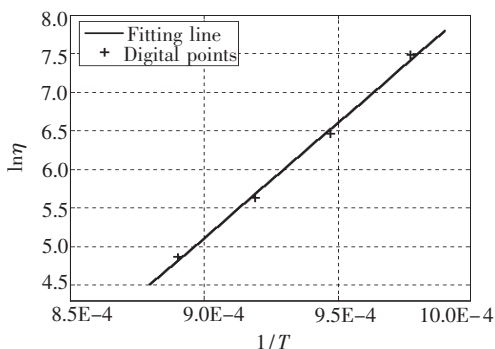


图 2 寿命特征图

Fig. 2 Curve of life characteristic pattern

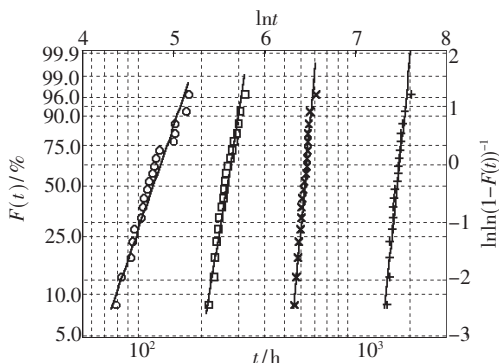


图 1 恒定应力数据统计曲线。+、×、□、○分别为恒定  $T_1、T_2、T_3、T_4$  数据点;—拟合直线。

Fig. 1 Statistics curves of constant-stress data

其决定系数为  $R^2=0.9968$ ,非常接近于 1,说明拟合程度很好。

#### 5.3 K-S 检验

根据 K-S 理论<sup>[11]</sup>,虽然样本容量较小 ( $n=20$ ),但在检验时取较大的显著性水平,这里取  $\alpha=0.2$ 。编写了 K-S 检验程序,对 4 组应力试验样品的失效时间进行检验,假设检验结果均为 0,观测的 K-S 统计量  $KSSTAT$  分别为  $KSSTAT_1=0.1344, KSSTAT_2=0.1155, KSSTAT_3=0.1315, KSSTAT_4=0.1443$ ,它们全都小于阈值  $CV=0.2316$ ,说明均通过了 K-S 检验。

#### 5.4 正常温度应力下的寿命预测

将温度应力  $T_0=923.95\text{ K}$  代入加速寿命方程式(14),可得到 VFD 在正常应力下的尺度参数  $\eta_0=38\ 912.20\text{ h}$ ;将  $m_i (i=1,2,3,4)$  代入式(13)可求出  $T_0$  温度下的形状参数  $m_0=m=11.92$ ,再结合式(12),便可得到 VFD 的平均寿命

$\mu=37\ 279.98$  h 和可靠寿命  $t_{R=0.9}=32\ 219.13$  h。

目前,VFD实际使用的平均寿命约为 37 000 h,将计算的平均寿命  $\mu=37\ 279.98$  h 与实际值进行比较,本文计算值的相对误差仅为 0.76%。因此,本文通过 4 组恒定应力加速寿命试验所计算的结果很精确。

## 6 结 论

对 VFD 进行了 4 组恒定应力加速寿命试验,采用 LSM 对试验数据进行统计与分析,得出结论如下:

(1)加速寿命试验设计方案是正确可行的,恒定应力数据统计曲线中的 4 条拟合直线近似平

行,这充分证明了各加速应力水平下 VFD 失效机理不变;

(2)4 个应力拟合的加速寿命直线的决定系数  $R^2=0.996\ 8$ ,非常接近于 1,证明 VFD 的加速模型符合阿伦尼斯方程;

(3)K-S 检验证实了 VFD 的寿命服从威布尔分布,说明得到的 VFD 可靠性特征量的估计是可信和有效的;

(4)自行设计开发的寿命预测软件使得复杂的 VFD 加速寿命试验数据统计分析变得简单,精确预测出的 VFD 寿命可为生产厂商和技术人员进行可靠性寿命预测和设计提供重要的技术指导。

## 参 考 文 献:

- [1] 阮世平. 真空荧光显示器件及驱动技术 [J]. 液晶与显示, 1996, 11(1):75-81.
- [2] 沈伟. 艳丽多彩的真空荧光显示屏 [J]. 液晶与显示, 2001, 16(2):140-144.
- [3] 张建平, 王睿韬. 基于 MAM 的真空荧光显示器寿命预测 [J]. 液晶与显示, 2008, 23(6):765-770.
- [4] Watkins A J, John A M. On constant stress accelerated life tests terminated by type II censoring at one of the stress levels [J]. *J. Statistical Planning and Inference*, 2008, 138:768-786.
- [5] Tang L C, Tan A P, Ong S H. Planning accelerated life tests with three constant stress levels [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2002, 42(2-4):439-446.
- [6] 茆诗松. 威布尔分布下恒加试验数据的数值分析法 [J]. 质量与可靠性, 2003, (6):16-23.
- [7] Zhang Jianping, Geng Xinmin. Constant-step stress accelerated life test of VFD under Weibull distribution [J]. *J. Zhejiang University Science*, 2005, 6A(7):722-727.
- [8] 茆诗松. 加速寿命试验的加速模型 [J]. 质量与可靠性, 2003, (2):15-17.
- [9] Weibull W. A statistical function of wide applicability [J]. *J. Appl. Mechanics*, 1951, 18(3):293-298.
- [10] Zhang Jianping, Xie Xiuzhong, Zhao Keren. Constant-step stress accelerated life test of VFD under logarithmic normal distribution case [J]. *J. Shanghai Jiaotong University (Science, English Edition)*, 2006, E-11(1):14-17.
- [11] Barr D R, Davidson T. A Kolmogorov-Smirnov test for censored samples [J]. *Technometrics*, 1973, 15(4):739-757.