

文章编号: 1007-2780(2012)02-0187-06

基于 BRM 的白光 OLED 恒定与 步进应力加速寿命试验研究

张建平¹, 吴 亮¹, 成国梁², 周廷君¹, 朱文清³

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

2. 上海天逸电器有限公司, 上海 201611;

3. 上海大学 新型显示技术及应用集成教育部重点实验室, 上海 200072)

摘 要: 为了获得白光 OLED 的寿命信息, 通过加大电流应力开展了二组恒定和一组步进应力相组合的加速寿命试验。采用威布尔函数描述白光 OLED 的寿命分布, 利用双线性回归法(BRM)估计出威布尔参数, 确定了加速寿命方程, 对白光 OLED 寿命是否符合威布尔分布进行了 Kolmogorov-Smirnov 检验, 并利用自行开发的寿命预测软件计算出平均寿命和中位寿命。数值结果表明, 恒定步进应力加速寿命试验方案是切实可行的, 白光 OLED 的寿命服从威布尔分布, 寿命应力关系满足线性 Arrhenius 方程, 精确计算的加速参数可实现短时间内 OLED 寿命的预测。

关 键 词: OLED; 加速寿命试验; 威布尔; BRM

中图分类号: TN873⁺.3 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3788/YJYXS20122702.0187

Constant-Step Stress Accelerated Life Tests of White OLED by BRM

ZHANG Jian-ping¹, WU Liang¹, CHENG Guo-liang², ZHOU Ting-jun¹, ZHU Wen-qing³

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

2. Shanghai Tianyi Electric CO., LTD, Shanghai 201611, China;

3. Key Laboratory of Advanced Display and System Applications of EMC, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: In order to acquire the life information of white OLED, two constant and one step stress accelerated life tests (ALT) were conducted with current stress increased. Weibull Distribution function was applied to describing the life distribution, Bilinear Regression Method (BRM) was employed to estimate the Weibull parameters, and the accelerated life equation was determined. The Kolmogorov-Smirnov test was performed to verify whether the White OLED life met the Weibull distribution or not, and the software developed by authors was used to calculate the average life and median life. The numerical results indicate that the test plans of constant-step ALT are feasible and versatile, that the OLED life follows the Weibull distribution, and that the life-stress relationship satisfies linear

收稿日期: 2011-11-08; 修订日期: 2011-11-24

基金项目: 上海市科委项目(No. 11160500600, No. 10dz1140206); 新型显示技术及应用集成教育部重点实验室(上海大学)(No. P201002); 上海市自然科学基金(No. 09ZR1413000, 11ZR1414200); 上海市教育委员会科研创新项目(No. 11ZZ172, 11ZZ171); 上海市教委重点学科(第五期)J51304; 上海市教委第三期本科教育高地建设项目

作者简介: 张建平(1972—), 男, 江苏南京人, 博士后, 教授, 主要从事机电产品寿命预测与可靠性分析、电磁除尘技术、新能源装置中关键部件的力学行为分析、储能技术等方面的研究。

Arrhenius equation completely. The precise accelerated parameter is shown to be particularly useful to predict the OLED life within shorter time.

Key words: OLED; accelerated life test; Weibull; BRM

1 引 言

有机发光二极管(Organic Light Emitting Diode, OLED)是由光刻电极基板与有机发光材料构成的显示器件^[1],由于其轻、薄、宽视角、低功耗、响应速度快等优点,具有极大的竞争力和市场应用潜力^[2]。

在经历了几十年的发展,聚合物 EL 器件寿命已超过 1 万小时^[3],OLED 产品已经占据了一定的市场,但要与 LCD 竞争,OLED 的研究机构和生产厂商还要做各种努力,而寿命问题是其最大的技术难点,OLED 的工作稳定性和可靠性寿命仍然是人们普遍关注的问题。2007 年精工爱普生公司发布了最新研发成果——“终极之黑(the ultimate black)”OLED 显示系统,突破业界 2~3 万小时的技术瓶颈,极大扩展了 OLED 显示系统的应用前景^[4]。对于 OLED 产品随着各生产厂商的科技水平日益提高,其寿命也不断增加,然而在确定 OLED 产品寿命信息的过程中,一般 OLED 寿命试验需一年以上的的时间,在时间和经费上来说已成为企业的沉重负担,有的试验结果出来后,很可能产品已经更新,失去了试验的意义。因此有必要改进通常的寿命试验方法,推出一种符合 OLED 失效机理的加速寿命试验方法。

电子产品加速寿命试验方法研究已有近 50 年的历史^[5],加速寿命试验技术是将在高应力下较短时间内获得的产品寿命数据外推到产品正常应力下的寿命和可靠性的技术^[6]。Friedrich Eisenbrand 等^[7]考虑了 OLED 显示器件控制器设计中的一个最优化问题,提出了以降低器件电流的方法来达到提升 OLED 寿命的目的,并为此设计了一种最优化算法来实现 OLED 寿命的改善。Kapil 等^[8]对导致 AMOLED 显示屏失效的主要因素进行了定性及定量分析,并制定了 TFT 像素电路加速应力测试的一般方法,在高电应力和温度的基础上取得加速因子,大大减少了测试所需的时间。Chang-Jung Juan 等^[9]介绍了一种有

机发光二极管(OLED)寿命的测试系统,可同时 对 256 路 OLED 面板进行寿命测试。

本文通过加大白光 OLED 驱动电流开展了两组恒定和一组步进应力加速寿命试验,应用三参数威布尔函数来描述其寿命分布,利用 BRM 完成对 OLED 的加速寿命试验数据的统计分析,实现了白光 OLED 寿命预测。

2 OLED 加速寿命试验方案

2.1 加速应力水平的选择

由于 OLED 是由电流驱动的显示器件,电流是导致 OLED 失效的主要因素。因此,本文选取 4 组应力水平: $I_1 = 9.64 \text{ mA}$ 、 $I_2 = 12.36 \text{ mA}$ 、 $I_3 = 17.09 \text{ mA}$ 、 $I_4 = 22.58 \text{ mA}$ 。这里,开展两组恒定应力试验(I_1 和 I_3)和一组步进应力试验($I_1 \rightarrow I_2 \rightarrow I_3 \rightarrow I_4$)。此外,试验样品正常工作时的电流为 $I_0 = 3.20 \text{ mA}$ 。

2.2 失效标准和试验终止时间的确定

根据 OLED 的行业失效标准(测试位亮度低于初始亮度的 50%)记录每个试验样品的失效时间^[10],当每个电流应力水平下的试验样品全部失效,试验终止。

3 OLED 加速寿命试验理论模型

3.1 寿命分布

威布尔分布是瑞典物理学家 W. Weibull 在分析材料强度及链条强度时推导出的一种分布函数,具有使用范围广、数据拟合能力强等特点^[11]。由于对 OLED 产品的寿命预测中,除了关心平均寿命、可靠寿命等外,还关心其可能的最小寿命,因此,在 OLED 寿命分析中引入三参数威布尔分布。设 OLED 的寿命服从三参数威布尔分布,其分布函数为:

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t-t_0}{\eta}\right)^m\right] \quad (1)$$

式中: $t \geq t_0$, $m, \eta > 0$ 。 m 为形状参数,其值的大小决定密度曲线的几何形状; η 为尺度参数,它决定着 $F(t)$ 曲线的陡度, η 越大,寿命越长,但数据也

越分散,说明失效机理越复杂; t_0 为位置参数,也称最小寿命,表明产品在以前不会发生失效,失效只在以后发生,不影响密度曲线的形状,只是使密度曲线发生平移。

3.2 加速模型

设 OLED 的特征寿命 $T_{e^{-1}}$ 与电流应力 I 满足以下加速模型,即^[12]:

$$\ln T_{e^{-1}} = \ln(\eta + t_0) = \alpha + \beta \ln I \quad (2)$$

式中: α, β 为加速参数。

3.3 威布尔分布的参数估计

线性回归分析是可靠性分析中概率分布三参数估值的常用方法之一,单一回归性的图估法缺乏精度指标,而且过程及步骤繁杂。为此,通过增加一条回归线的方法来解决,使估算方法简单方便,而且由计算机来实现。

3.3.1 双线性回归分析原理

根据三参数威布尔分布函数式(1),可以得到以下两种形式的线性函数式:

$$\ln \ln \frac{1}{1 - F(t)} = m \ln(t - t_0) - m \ln \eta \quad (3)$$

$$\left(\ln \frac{1}{1 - F(t)} \right)^{\frac{1}{m}} = \frac{t}{\eta} - \frac{t_0}{\eta} \quad (4)$$

它们均可表示为:

$$y_r = A_r x_r + B_r \quad (r = 1, 2) \quad (5)$$

式中:

$$\begin{cases} y_1 = \ln \ln \frac{1}{1 - F(t)}, x_1 = \ln(t - t_0) \\ A_1 = m, B_1 = -m \ln \eta \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} y_2 = \left(\ln \frac{1}{1 - F(t)} \right)^{\frac{1}{m}}, x_2 = t \\ A_2 = \frac{1}{\eta}, B_2 = -\frac{t_0}{\eta} \end{cases} \quad (7)$$

3.3.2 拟合方程

对于线性回归方程

$$Y = A \cdot X + B \quad (8)$$

由最小二乘法公式可知:

$$A = \frac{\overline{XY} - \overline{X}\overline{Y}}{\overline{X^2} - \overline{X}^2}, B = \overline{Y} - A\overline{X} \quad (9)$$

将式(6)及(7)代入回归公式(9),可以推得参数 m, t_0 以及 η 的表达式。由式(6)及(9)得形状参数 m 和尺度参数 η , 并注意到 $A_1 = m$ 可得:

$$m = \frac{[\overline{\ln(t - t_0)}] [\overline{\ln \ln \frac{1}{1 - F(t)}}] - [\overline{\ln(t - t_0)}] [\overline{\ln \ln \frac{1}{1 - F(t)}}]}{[\overline{\ln(t - t_0)}]^2 - [\overline{\ln(t - t_0)}]^2} \quad (10)$$

$$\eta = \sqrt[m]{\exp \left\{ \left[m \overline{\ln(t - t_0)} - \left(\overline{\ln \ln \frac{1}{1 - F(t)}} \right) \right] \right\}} \quad (11)$$

位置参数 t_0 由式(7)及式(9)推得:

$$t_0 = \bar{t} - \frac{[\overline{t^2} - \bar{t}^2] \left[\overline{\ln \frac{1}{1 - F(t)}} \right]^{\frac{1}{m}}}{\bar{t} \left[\overline{\ln \frac{1}{1 - F(t)}} \right]^{\frac{1}{m}} - \overline{t \left[\ln \frac{1}{1 - F(t)} \right]^{\frac{1}{m}}}} \quad (12)$$

以上 3 个关于 m, t_0 以及 η 计算公式可以分别记为:

$$m = f_1(t_0), t_0 = f_2(m), \eta = f_3(m, t_0) \quad (13)$$

显然, m 与 t_0 是互为现成的迭代算式。对于 $m = f_1(t_0)$ 和 $t_0 = f_2(m)$ 两曲线相交的情况:

(1) 两曲线相交:首先可以断定,两曲线必定相交且交于一点,若不相交则可解释为数据不服从威布尔分布,相交两点以上在实际物理意义上无法解释;

(2) 两曲线为缓和单调降:因为估值本身的

含义就是一种平滑作用。由威布尔分布的特性可知:假设 t_0 增大,则 m 得减少,反之亦然;

(3) 两曲线的定义域:对于 $m = f_1(t_0)$, 两曲线的定义域显而易见为 $t_0 \in [0, t_{\min}]$ 。对于 $t_0 = f_2(m)$, 显而易见为 $m > 0$, 且实际中要求 m 不要太大,一般取 $m \leq 7$ 。

下面设计迭代求解的算法:

(1) 给任一 m 初值,一般为 $m = (m_{\text{上限}} + m_{\text{下限}}) / 2$;

(2) 由 $t_0 = f_2(m)$ 得一 t_0 值,再由 $m = f_1(t_0)$ 得一 m^* 值;

(3) 若 $m^* > m$, 则减少 m ; 若 $m^* < m$, 则增大 m 。由此得以循环;

(4) 当计算满足精度即 $|m^* - m| < \epsilon$ ($\epsilon = 10^{-8}$) 时,计算停止。

当 m 和 t_0 求解后,将 m 和 t_0 代入 $\eta = f_3(m, t_0)$

即可求得 η_0 。

3.4 寿命计算

三参数威布尔分布下 OLED 在正常电流应力 I_0 下的平均寿命 μ 和中位寿命 $t_{0.5}$ ：

$$\begin{aligned} \mu &= t_0 + \eta_0 \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right), \\ t_{0.5} &= t_0 + \eta_0 \left(\ln \frac{1}{0.5}\right)^{\frac{1}{m}} \end{aligned} \quad (14)$$

式中： $\Gamma(\cdot)$ 为伽马函数， η_0 为 I_0 下的尺度参数。 I_0 下的形状参数 m 可取加权平均^[13]：

$$m = \frac{\sum_{i=1}^4 n_i m_i}{\sum_{i=1}^4 n_i} \quad (15)$$

表 1 I_1 和 I_3 恒定应力试验样品的失效时间

Table 1 Sample failure time of constant-stress tests at I_1, I_3

| 电流应力/ mA | 失效时间/h | | | | | | | | | |
|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | t_1 | t_2 | t_3 | t_4 | t_5 | t_6 | t_7 | t_8 | t_9 | t_{10} |
| $I_1=9.64$ | 1 691.50 | 2 084.67 | 2 092.50 | 2 100.32 | 2 374.50 | 2 421.50 | 2 586.00 | 2 621.50 | 2 868.00 | 2 879.50 |
| $I_3=17.09$ | 601.50 | 689.67 | 697.33 | 716.50 | 785.50 | 854.50 | 889.50 | 1 115.67 | 1 131.33 | 1 251.50 |

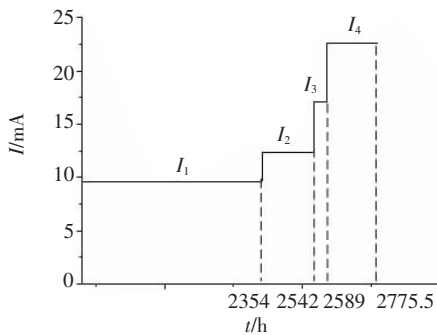


图 1 步进应力试验的应力施加模式

Fig. 1 Applied stress models of step-stress test

表 2 步进应力试验的失效时间

Table 2 Sample failure time of step-stress tests

| 样品 | 失效时间/h | | | |
|----|---------|---------|---------|---------|
| | I_1 | I_2 | I_3 | I_4 |
| 1 | 2 330.5 | - | - | - |
| 2 | - | 2 377.5 | - | - |
| 3 | - | 2 518.5 | - | - |
| 4 | - | - | 2 565.5 | - |
| 5 | - | - | 2 589.0 | - |
| 6 | - | - | - | 2 700.5 |
| 7 | - | - | - | 2 740.5 |
| 8 | - | - | - | 2 775.5 |

式中： $n_i (i=1,2,3,4)$ 为每个电流应力下的样品个数。

4 试验数据

针对 M00071 型白光 OLED，在保证加速效果达到最大而且失效机理不变的情形下开展两组恒定和一组步进应力加速寿命试验。恒定电流应力水平为 $I_1=9.64$ mA 和 $I_3=17.09$ mA，试验样品的失效时间列于表 1。

对于步进应力试验，具体的步进应力试验的应力 ($I_1 \rightarrow I_2 \rightarrow I_3 \rightarrow I_4$) 施加模式如图 1 所示，每步应力的失效时间见表 2。

5 试验数据的统计与分析

5.1 恒定应力试验数据处理

用双线性回归法 (BRM) 对表 1 中两组恒定应力数据进行处理，可求得形状参数及尺度参数，如表 3 所示。

5.2 加速寿命方程

将表 3 中的 $I_1=9.64$ mA、 $I_3=17.09$ mA 两组恒定应力下的 $\eta_1=2 600.756 8$ 、 $t_{01}=304.394 6$ 和 $\eta_3=959.945 7$ 、 $t_{03}=557.539 2$ 分别代入式 (2)，联合求解得到 $\alpha=11.701 9$ 、 $\beta=-1.719 3$ ，则加速寿命方程为：

$$\ln(\eta + t_0) = 11.701 9 - 1.719 3 \ln I \quad (16)$$

5.3 步进应力试验数据处理

为进行试验数据统计，需要将表 2 中步进应力试验中样品的失效时间折算成恒定应力下的时间。假定试验中失效机理保持不变，即 $m_i = m_j$ ，再结合式 (2)，根据加速系数的定义，由此得电流应力 I_i 相对于 I_j 时的寿命加速系数 τ_{ij} 为^[14]：

$$\tau_{ij} = \frac{t_i}{t_j} = \left(\frac{I_i}{I_j}\right)^\beta \quad (17)$$

通过加速系数便可将步进应力下样品的失效时间折算成 I_2, I_4 下的失效时间，利用上式可得

折合公式如下:

$$t_{I_2} = t_{I_1} / \tau_{12}, \quad t_{I_4} = t_{I_1} / \tau_{14} \quad (18)$$

先把步进加速寿命试验中各应力 $I_i (i=2,3,4)$ 下

样品的失效时间都折算成 I_1 下的失效时间,结合图 1,折算公式见式(19)。

式中: $\beta=-1.7193, t_1^*=235.4 \text{ h}, t_2^*=254.2 \text{ h},$

$$t_{I_1} = \begin{cases} t_i, & i = 1 \\ t_1^* + \tau_{12}(t_i - t_1^*), & 2 \leq i \leq 3 \\ t_1^* + \tau_{12}(t_2^* - t_1^*) + \tau_{13}(t_i - t_2^*), & 4 \leq i \leq 5 \\ t_1^* + \tau_{12}(t_2^* - t_1^*) + \tau_{13}(t_3^* - t_2^*) + \tau_{14}(t_i - t_3^*) & 6 \leq i \leq 8 \end{cases} \quad (19)$$

$t_3^*=2589 \text{ h}, t_i$ 为步进应力下的失效时间; τ_{12} 、 τ_{13} 、 τ_{14} 分别为 I_1 相对于 I_2 、 I_3 、 I_4 的加速系数,可分别由式(17)计算得到。

因此,再结合式(17)、(18)、(19),可将表 2 中

的步进失效时间折算成恒定应力 $I_2=12.36 \text{ mA}$ 和 $I_4=22.58 \text{ mA}$ 的时间,具体失效时间见表 4。利用同样的方法对表 4 中的数据进行处理,计算得 I_2 、 I_4 下的威布尔参数列于表 3。

表 3 各应力下的威布尔分布参数

Table 3 Weibull distribution parameters under each stress

| 应力 | 形状参数 | 尺度参数 | 位置参数 | 决定系数 |
|------------------------|--------------|--------------------|--------------------|----------------|
| $I_1=9.64 \text{ mA}$ | $m_1=5.6360$ | $\eta_1=2632.0007$ | $t_{01}=304.3946$ | $R_1^2=0.9596$ |
| $I_2=12.36 \text{ mA}$ | $m_2=1.3282$ | $\eta_2=527.3012$ | $t_{02}=1370.8674$ | $R_2^2=0.9403$ |
| $I_3=17.09 \text{ mA}$ | $m_3=1.2956$ | $\eta_3=359.9825$ | $t_{03}=557.5392$ | $R_3^2=0.9544$ |
| $I_4=22.58 \text{ mA}$ | $m_4=1.3282$ | $\eta_4=187.1164$ | $t_{04}=486.4615$ | $R_4^2=0.9403$ |

表 4 步进应力下的失效时间折算到 I_2 、 I_4 应力下的失效时间

Table 4 Failure time at I_2 、 I_4 converted by sample ones of step-stress tests

| 应力/ mA | 失效时间/h | | | | | | | |
|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | t_1 | t_2 | t_3 | t_4 | t_5 | t_6 | t_7 | t_8 |
| I_2 | 1471.61 | 1509.95 | 1650.95 | 1715.47 | 1756.49 | 2070.70 | 2183.43 | 2282.06 |
| I_4 | 522.21 | 535.82 | 585.85 | 608.75 | 623.30 | 734.80 | 774.80 | 809.80 |

5.4 加速参数的修正

将表 3 中的各应力下的数据点($\ln I_i, \ln(t_{0i} + \eta_i)$)($i=1,2,3,4$)绘于图 2,采用最小二乘法进行拟合,求解出式(2)的加速参数 $\alpha=11.4985$ 、 $\beta=-1.6117$,则修正后的加速寿命试验方程为:

$$\ln(\eta + t_0) = 11.4985 - 1.6117 \ln I \quad (20)$$

加速寿命曲线,即 OLED 寿命特征图,如图 2 所示,其决定系数 $R^2=0.9791$,接近于 1,说明拟合程度非常好。

5.5 分布拟合的检验

这里,采用 K-S 理论^[15]来进行检验,考虑到样本容量较小,在检验时以取较大的显著性水平为宜。这里取 $\alpha=0.2$ ^[13],假设检验结果均为 0,电流应力 I_1 和 I_3 下观测的 K-S 统计量 $D_n^{1,3} =$

$\{0.1455, 0.1389\} < D_{0.2,10} = 0.3226$,电流应力 I_2 和 I_4 下观测的 K-S 统计量 $D_n^{2,4} = \{0.1419, 0.1419\} < D_{0.2,8} = 0.3583$,这说明均通过了 K-S 检验。

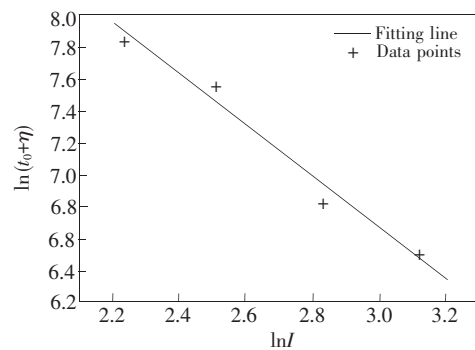


图 2 寿命特征图

Fig. 2 Curve of life characteristic pattern

5.6 正常工作电流下的寿命信息

当 M00071 型白光 OLED 寿命服从威布尔分布时,在正常工作电应力 $I_0 = 3.20 \text{ mA}$ 下,将表 2 中的 m_i 代入式(15),并结合 $n_1 = n_3 = 10$ (见表 1)与 $n_2 = n_4 = 8$ (见表 4),可求出 I_0 下的形状参数 $m = 2.5157$ 。将 OLED 客户实际使用最小寿命的平均值作为 OLED 的位置参数 t_0 ,即 $t_0 = 14\,897.460\,4 \text{ h}$,再把 $I_0 = 3.20 \text{ mA}$ 代入加速寿命方程(20),可推得正常工作电应力 I_0 下的尺度参数 $\eta_0 = 224.078\,9$ 。因此,再利用式(14)便可分别求得正常电流应力 I_0 下白光 OLED 的平均寿命和中位寿命: $\mu = 15\,096.3 \text{ h}$, $t_{0.5} = 14\,989.1 \text{ h}$ 。

目前该型号白光 OLED 市场实绩表明其平均寿命在 1.6 万小时左右,由于不同的结构,材料和工艺会造成产品寿命有一定差异,因此,本文得

到的白光 OLED 平均寿命与客户反馈数据比较接近。

6 结 论

通过 OLED 恒定、步进应力相组合的加速寿命试验以及试验数据的统计分析,得出结论如下:

(1)本文中各应力下的失效时间均通过了 K-S 检验,表明白光 OLED 产品的寿命服从三参数威布尔分布;

(2)加速寿命曲线的拟合系数 $R^2 = 0.979\,1$ 很接近于 1,证实白光 OLED 符合加速模型的假定;

(3)自行开发的寿命预测软件,使得复杂的 OLED 加速寿命试验数据统计分析变得简单,得到的寿命信息比较接近白光 OLED 的实际寿命,这对 OLED 生产厂商和用户有很强的指导意义。

参 考 文 献:

- [1] 袁永波, 连加容, 周翔. 空穴阻挡层对有机发光二极管寿命的影响 [J]. 电子器件, 2008, 31(1): 25-28.
- [2] 郭朋辉. OLED 器件技术及产业化进展 [R]. 技术论坛, 2010, (1): 46-50.
- [3] 冯迪砂, 吴斌. OLED 显示技术综述 [J]. 福建电脑, 2006, (5): 28-30.
- [4] 许伟. 寿命是目前 OLED 最大技术难点 [N]. 中国电子报, 2008-01-01(8).
- [5] 陈循, 张春华. 加速试验技术的研究、应用与发展 [J]. 机械工程学报, 2009, 45(8): 130-136.
- [6] 黄婷婷, 姜同敏. 加速寿命试验中统计加速模型综述 [J]. 装备环境工程, 2010, 7(4): 57-62.
- [7] Eisenbrand F, Karrenbauer A, Xu C H. Algorithms for longer OLED lifetime [J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 2007, 4525: 338-351.
- [8] Sakariya K, Ng C K M, Servati P, et al. Accelerated stress testing of a-Si:H pixel circuits for AMOLED displays [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2005, 52(12): 2577-2583.
- [9] Juan C J, Tsai M J. Implementation of a novel system for measuring the lifetime of OLED panels [J]. *IEEE Consume Electronics*, 2003, 49(1): 1-2.
- [10] Jong In Park, Suk Joo Bae. Direct prediction methods on lifetime distribution of organic light-emitting diodes from accelerated degradation tests [J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2010, 59(1): 74-90.
- [11] 李书明, 董成利, 黄燕晓. 基于威布尔的发动机涡轮叶片寿命可靠性评估 [J]. 中国民航大学学报, 2008, 26(4): 14-17.
- [12] 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.
- [13] Zhang J P, Wang R T. Reliability life prediction of VFD by constant temperature stress accelerated life tests and maximum likelihood estimation [J]. *J. Testing and Evaluation*, 2009, 37(4): 316-320.
- [14] 张建平, 武文丽, 朱文清. Weibull 分布下基于 MLE 的红外发光二极管寿命预测 [J]. 半导体光电, 2011, 32(1): 47-51.
- [15] Barr D R, Davidson T. A Kolmogorov-Smirnov test for censored samples [J]. *Technometrics*, 1973, 15(4): 739-757.