

文章编号:1007-2780(2015)03-0525-06

三参数 Weibull 分布下基于 BRM 的 LED 照明灯寿命预测

张建平^{1,2*}, 陈文龙¹, 陈晓², 应开雄³, 成国梁², 邱迎吉², 金蓓雯²

(1. 上海电力学院 能源与机械工程学院, 上海 200090; 2. 上海天逸电器股份有限公司, 上海 201611;

3. 浙江京东方显示技术有限公司, 浙江 绍兴 312000)

摘要:为了在短时间内准确获得 LED 照明灯的寿命信息,以 3 组恒定加速应力的试验数据为基础,采用三参数 Weibull 函数描述其寿命分布,基于双线性回归法(BRM)对试验数据进行处理分析,并利用自行开发的寿命预测软件较为精确地得出 LED 照明灯在正常工作应力下的寿命。数值结果表明,LED 照明灯的寿命服从三参数 Weibull 分布,其加速模型符合 Arrhenius 方程,精确预测的 LED 照明灯寿命为工程技术人员关于产品的可靠性设计提供技术参考。

关键词:Weibull 函数; Arrhenius 方程; BRM; LED 照明灯; 寿命预测

中图分类号:TN364.2 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20153003.0525

Life prediction of LED lamps based on BRM under three-parameter weibull distribution

ZHANG Jian-ping^{1,2*}, CHEN Wen-long¹, CHEN Xiao², YING Kai-xiong³,
CHENG Guo-liang², QIU Ying-ji², JIN Bei-wen²

(1. College of Energy and Mechanical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. Shanghai Tayee Electric Co. LTD., Shanghai 201611, China;

3. Zhejiang Jingdongfang Display Technology Co., Ltd, Shaoxing 312000, China)

Abstract: In order to accurately obtain the life information of LED lamps in a short time, three-parameter Weibull function was applied to describing the life distribution based on three groups of constant-stress accelerated life test data. The processing and analysis on test data was achieved by Bilinear Regression Method (BRM), and the self-developed life prediction software was employed to precisely calculate the life of LED lamps under normal working stress. The numerical results show that the LED lamps life submits to three-parameter Weibull distribution, and the accelerated model meets the Arrhenius equation. The LED lamps' life predicted precisely can provide technical references for engineering technicians with regard to the product's reliability design.

Key words: Weibull function; Arrhenius equation; BRM; LED lamps; life prediction

收稿日期:2014-07-11; 修订日期:2014-09-02.

基金项目:上海市优秀学科带头人计划(B类)项目(No. 13XD1425200);上海市教育委员会科研创新项目(No. 14ZZ154);上海市科委部分地方院校能力建设项目(No. 13160501000);国家自然科学基金项目(No. 50706025, No. 51201097)

* 通信联系人, E-mail:jpzhanglzu@163.com

1 引 言

发光二极管(LED)作为一种新型高效的固体光源,与传统白炽灯和荧光灯相比,具有体积小、寿命长、无毒、高亮度、不易破碎、低能耗、可回收再利用和响应速度快等优点^[1-2],已广泛应用于显示屏、背光源、汽车照明、指示信号灯和景观照明等各种领域,被誉为最具发展潜力的第四代照明光源。随着半导体技术的不断发展,市场上 LED 照明灯在正常使用条件下的寿命均高达数万小时^[3],而目前关于 LED 照明灯寿命预测方法的国家标准还不明确。为了节省 LED 照明灯寿命试验时间,降低寿命预测成本,弄清失效机理,迫切需要对其开展加速寿命预测的研究,以期在短时间内掌握产品的寿命信息。

目前,国内外学者关于测试 LED 等光电类产品的寿命,主要采用温度加速应力试验或电流加速应力试验两种方法^[4]。笔者对有机发光二极管(OLED)利用对数正态分布和最小二乘法(LSM)完成了寿命预测^[5]。Yazdan Mehr 等^[6]和 Wang 等^[7]基于亮度指数衰减模型预测了 LED 灯珠的寿命。董懿^[8]通过三组恒定温度应力加速寿命试验得到了 LED 照明灯的寿命信息,但在寿命推算方面,得到的特征寿命误差较大。

针对文献[8]预测 LED 照明灯寿命精度不高的问题,本文利用三参数 Weibull 分布和双线性回归法(Bilinear Regression Method, BRM)相结合的方法完成了加速寿命试验数据的统计分析,这种方法的优点在于寿命计算精度高且简单易行,是一种快速高效得到 LED 照明灯寿命信息的方法。

2 寿命预测理论模型

2.1 寿命预测流程

对于光电类产品,加速寿命预测的基本思想是运用较高应力水平下的寿命信息来推导正常应力水平下的寿命特征,其基本方法是根据加速寿命试验数据选取合适的寿命分布函数和加速寿命模型,再采用合理的寿命参数估计方法完成试验数据的统计分析,从而得到产品的寿命信息。

对于 LED 照明灯,这里采用三参数 Weibull 分布函数、BRM 以及 Arrhenius 加速模型来精确预测其寿命,寿命预测基本流程如图 1 所示。

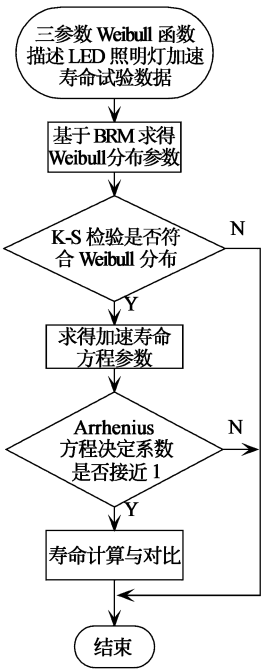


图 1 LED 照明灯寿命预测流程
Fig. 1 Flowchart of life prediction for LED lamps

2.2 寿命分布函数

Weibull 分布在可靠性工程中被广泛应用,尤其适用于产品累计失效的分布形式,在各种寿命试验的数据处理方面,它具有较好数据拟合效果^[9]。为获得 LED 照明灯的寿命信息,先假设其寿命服从三参数 Weibull 分布,则有^[10]:

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

式中: m 、 η 、 t_0 分别为形状参数、尺度参数和位置参数。实际上,Weibull 三参数在计算 LED 照明灯的寿命中起关键作用。

2.3 寿命参数估计

线性回归是利用称为线性回归方程的最小平方法对一个或多个自变量和因变量之间关系进行建模的一种回归分析方法,在统计学中应用十分广泛,单一回归性方法误差较大,而双线性回归法极大地提高了计算的精度。因此,这里基于 BRM 来计算 Weibull 函数的 3 个参数。

将式(1)进行变形,可以得到以下两种形式的线性函数式:

$$\ln\ln \frac{1}{1-F(t)} = m\ln(t-t_0) - m\ln\eta, \quad (2)$$

$$t = \eta \cdot \left(\ln \frac{1}{1-F(t)}\right)^{\frac{1}{m_i}} + t_0, \quad (3)$$

上式均可简写为:

$$y_k = A_k x_k + B_k \quad (k = 1, 2), \quad (4)$$

其中:

$$\begin{cases} y_1 = \ln\ln \frac{1}{1-F(t)}, x_1 = \ln(t-t_0) \\ A_1 = m, B_1 = -m\ln\eta \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} y_2 = t, x_2 = \ln\left(\frac{1}{1-F(t)}\right)^{\frac{1}{m}} \\ A_2 = \eta, B_2 = t_0 \end{cases} \quad (6)$$

对于线性回归方程

$$Y = A \cdot X + B \quad (7)$$

由 LSM 公式可得到:

$$A = \frac{\overline{XY} - \bar{X}\bar{Y}}{\overline{X^2} - \bar{X}^2}, \quad B = \bar{Y} - A\bar{X} \quad (8)$$

由式(5)及(7)可得形状参数 m 为:

$$m = \frac{\overline{[\ln(t-t_0)] [\ln\ln \frac{1}{1-F(t)}]} - [\overline{\ln(t-t_0)}] [\overline{\ln\ln \frac{1}{1-F(t)}}]}{[\overline{[\ln(t-t_0)]^2}] - [\overline{\ln(t-t_0)}]^2}, \quad (9)$$

再结合 $A_1 = m$ 可得到尺度参数 η 表达式为:

$$\eta = \sqrt[m]{\exp[m \ln(t-t_0) - \ln\ln \frac{1}{1-F(t)}]}. \quad (10)$$

由式(6)及(7)可得到位置参数:

$$t_0 = t - \frac{t [\ln \frac{1}{1-F(t)}]^{\frac{1}{m}} - t [\ln \frac{1}{1-F(t)}]^{\frac{1}{m}}}{[\ln \frac{1}{1-F(t)}]^{\frac{2}{m}} - [\ln \frac{1}{1-F(t)}]^{\frac{1}{m}}}. \quad (11)$$

事实上,式(9)、(10)及(11)分别是关于 m 、 η 以及 t_0 的计算公式,可以记为一般函数,即有:

$$\begin{aligned} m &= g_1(t_0), \eta = g_2(m, t_0), \\ t_0 &= g_3(m). \end{aligned} \quad (12)$$

由式(12)可知, m 与 t_0 是相互迭代的算式,可通过迭代的方式求解参数 m 、 η 以及 t_0 ,具体迭代流程图如图 2 所示。

2.4 拟合精度衡量

为了衡量曲线拟合的精度,即拟合值与真实值之间的偏差程度,通常采用残差平方和 Q 作为统计分析指标。 Q 即为所有观测点距回归直线的残余误差的平方和。它是在排除掉因试验误差、 x 对 y 的非线性影响以及其他未加控制因素的影响情况下,得到 x 对 y 的变差,用于考虑 x 与 y 之间的线性关系。 Q 可用式(13)表示:

$$Q = \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2. \quad (13)$$

残余标准差 ϵ 是回归方程的精度参数,估计出 y 的随机波动量,其值愈小,回归方程的准确度

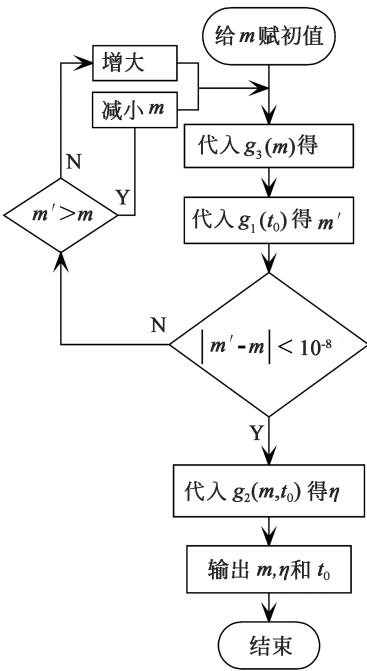


图 2 基于三参数 Weibull 函数的 BRM 迭代流程图
Fig. 2 BRM iterative flowchart based on three-parameter Weibull function

愈高, ϵ 可写为:

$$\epsilon = \sqrt{\frac{Q}{N-2}}, \quad (14)$$

式中: N 为样本个数。

3 试验数据

在 LED 照明灯寿命预测研究中,文献[8]在保证加速效果达到最大而且失效机理不变的情形

下,以温度为加速应力开展了 3 组恒定应力 $T_1 = 333.15\text{ K}$ 、 $T_2 = 353.15\text{ K}$ 、 $T_3 = 378.15\text{ K}$ 的加速寿命试验,样品数均为 $n_1 = n_2 = n_3 = 10$,在光

通量衰减到初始值 70% 作为失效标准情形下的样品失效时间列于表 1。

表 1 三组恒定应力试验下样品的失效时间^[8]
Tab. 1 Sample failure time of three groups of constant-stress tests^[8]

温度应力/ K	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}
$T_1 = 333.15$	8 010	8 621	9 296	9 834	10 327	10 755	11 728	11 993	12 732	13 500
$T_2 = 353.15$	3 685	3 906	4 043	4 457	4 599	4 865	5 088	5 390	5 635	5 952
$T_3 = 378.15$	1 995	2 093	2 240	2 255	2 318	2 418	2 433	2 505	2 623	2 765

4 统计与分析

为提高 LED 照明灯寿命预测的计算精度和效率,这里采用自行开发的寿命预测软件来完成对试验数据的计算与分析。

4.1 加速寿命方程的确定

在采用三参数 Weibull 函数描述 LED 照明灯寿命试验数据分布基础上,基于 BRM 对表 1 中的数据进行处理,求得各恒定温度应力下的形状参数、尺度参数及位置参数,列于表 2。

表 2 不同加速应力下的 Weibull 参数
Tab. 2 Weibull parameters under different accelerated stresses

加速应力	$T_1 = 333.15\text{ K}$	$T_2 = 353.15\text{ K}$	$T_3 = 378.15\text{ K}$
m_i	2.564 7	2.343 7	2.988 5
η	5 216.731 4	2 050.079 7	775.462 2
t_0	6 079.219 0	2 963.077 5	1 674.801 4

假设 LED 照明灯加速模型符合 Arrhenius 方程,则其特征寿命 T_e^{-1} 与温度应力 T 满足以下关系^[11]:

$$T_e^{-1} = \ln(\eta + t_0) = \alpha + \beta/T, \tag{15}$$

式中: α 和 β 为加速参数,对寿命预测结果的影响较大。

文献[8]先将 3 组 Weibull 函数的参数代入加速寿命方程中进行求解,再把 3 组加速参数的

均值作为 α 和 β 解,为减小误差,这里采用 LSM 进行计算,可得: $\alpha = -4.927\ 8$, $\beta = 4\ 750.186\ 5$ 。因此,式(15)可重写为:

$$\ln(\eta + t_0) = -4.927\ 8 + 4\ 750.186\ 5/T. \tag{16}$$

实际上,式(16)表征了 LED 照明灯在各温度应力水平下的加速寿命方程,即为寿命特征图,如图 2 所示。拟合曲线决定系数 $R^2 = 0.992\ 6$,非常接近 1,证明了 LED 照明灯的加速模型完全符合 Arrhenius 方程的假定,且说明拟合程度很好。

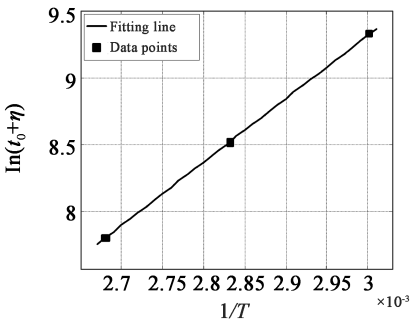


图 3 寿命特征图
Fig. 3 Life characteristic pattern

4.2 寿命分布模型的 K-S 检验

由于每组试验样本容量较小,均为 10 个,故在 K-S 检验时选取较大的显著性水平,这里取 $\alpha = 0.2$ 。对 3 组应力下试验样品的失效时间进行检验,计算得到的 K-S 统计量为: $D_n^{1,2,3} = \{0.1067, 0.1004, 0.1220\} < D_{0.2,10} = 0.3226$ 。因此说明了每组加速应力水平下的失效时间均通过了 K-S 检验,从而证明了 LED 照明灯寿命服从三参数 Weibull 分布假设的成立。

4.3 回归方程的显著性检验

为了说明三参数 Weibull 分布下基于 BRM 的 LED 照明灯寿命预测结果的精确性,将由式(16)计算出残余标准差 ϵ ($N = 10$) 与文献[8]的残余标准差进行对比,其结果列于表 3。

表 3 残余标准差的对比

Tab. 3 Comparison of residual standard deviation

温度应力	T_1	T_2	T_3
文献[8]残差	0.039 67	0.039 78	0.045 39
本文残差	0.025 39	0.029 56	0.032 69

从表 3 不难看出,本文三组应力条件下的残余标准差均比文献[8]的小,由此可说明本文数据处理与计算的方法更为准确,使预测出的 LED 照明灯在正常工作条件下的寿命更接近真实值。

4.4 寿命的计算与对比

三参数 Weibull 分布下,LED 照明灯在正常温度应力下的平均寿命计算公式为:

$$\mu = t_0 + \eta_0 \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right), \tag{17}$$

式中: $\Gamma(\cdot)$ 为伽马函数, η_0 和 m 分别为正常温度应力下的尺度参数和形状参数。

将正常温度应力 $T_0 = 298.15$ K 代入式(16),可得正常工作条件下的尺度参数 $\eta_0 = 46\,218.283\,3$ 。在各温度应力水平下 LED 照明灯的失效机理不变,即形状参数 m 不变,可通过各加速应力下的形状参数取加权平均来获得,则有:

$$m = \sum_{i=1}^3 n_i m_i / \sum_{i=1}^3 n_i, \tag{18}$$

将表 2 中的 m_i ($i = 1, 2, 3$) 以及每组加速应力下的试验样品数量代入式(18),可得到 $m = 2.632\,3$ 。在工程应用中,通常将实际使用中的最小寿命作为位置参数 t_0 ,对表 2 中 3 组温度应力和位置参数数据点进行数据拟合,可得 LED 照明灯正常工作条件下位置参数 $t_0 = 12\,934.7$ h。

因此,结合式(15)和(17)便可得其特征寿命 $T_e^{-1} = 60\,140.4$ h,平均寿命 $\mu = 54\,879.1$ h。

将本文和文献[8]计算的特征寿命均与国际上最权威的 ALTA9 加速寿命数据分析软件(试用版)所得出的寿命(Weibull 分布下)进行比较,结果见表 4。可以看出,文中所算出的特征寿命相对误差仅为 3.21%,而文献[8]的误差比本文高出 10 倍以上,这进一步说明了本文预测 LED 照明灯寿命的精度较高。

表 4 寿命比较

Tab. 4 Life comparison

	特征寿命/h	相对误差/%
ALTA9	62 137.0	—
文献[8]	40 011.8	35.61
本文	60 140.4	3.21

5 结 论

通过三参数 Weibull 分布下基于 BRM 对 3 组恒定应力加速寿命试验数据的统计与分析,可得出以下结论:

(1)各组温度应力下的寿命试验数据均通过了 K-S 检验理论,证实了三参数 Weibull 分布函数适用于描述 LED 照明灯的寿命分布。

(2)经残余标准差的对比与分析以及寿命结果的比较,说明了基于三参数 Weibull 分布下的 BRM 寿命预测方法得出的 LED 照明灯寿命精度较高。

(3)加速寿命曲线的决定系数非常接近 1,证明了 LED 照明灯的加速模型完全符合 Arrhenius 方程。

(4)精确得到的 LED 照明灯的寿命信息,为 LED 照明灯的生产厂商和用户有较好的参考价值。

参 考 文 献:

[1] 李相国,姚晓魁,赵广河. 一种基于模拟 PWM 的全彩色 LED 显示屏[J]. 液晶与显示,2014,29(3): 361-369.
Li X G, Yao X K, Zhao G H. Full-color LED display by simulation of PWM [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2014, 29(3): 361-369. (in Chinese)

- [2] Wu F T, Huang Q L. A precise model of LED lighting and its application in uniform illumination system [J]. *Optoelectronics Letters*, 2011, 7(5): 334-336.
- [3] 高伟. AlGaInP LED 转移衬底和可靠性的研究[D]. 北京:北京工业大学,2011.
Gao W. Study of substrate transfer and reliability of alGaInP LED [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2011. (in Chinese)
- [4] 李德高, 王万良, 闵芳胜, 等. 大功率 LED 寿命的理想因子表征[J]. 液晶与显示, 2008, 23(6): 722-725.
Li D G, Wang W L, Min F S, *et al.* Relation between ideal factor and lifetime [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2008, 23(6): 722-725. (in Chinese)
- [5] Zhang J P, Liu F, Wu H L, *et al.* Life prediction for white OLED based on LSM under lognormal distribution [J]. *Solid-State Electronics*, 2012, 75: 102-106.
- [6] Yazdanmehr M, Van Driel W D, Jansen K M B, *et al.* Lifetime assessment of bisphenol-a polycarbonate (BPA-PC) plastic lens, used in LED-based products [J]. *Microelectronics Reliability*. 2014, 54(1): 138-142.
- [7] Wang F K, Chu T P. Lifetime predictions of LED-based light bars by accelerated degradation test [J]. *Microelectronics Reliability*, 2012, 52(7): 1332-1336.
- [8] 董懿. 照明 LED 模块使用寿命快速检测方法的研究[D]. 杭州:中国计量学院,2012.
Dong Y. Research on Rapid detection technology for the life of light-emitting-diode lamps [D]. Hangzhou: *China Jiliang University*, 2012. (in Chinese)
- [9] Fan J J, Yung K C, Pecht M. Lifetime estimation of high-power white LED using degradation-data-driven method [J]. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, 2012, 12(2): 470-477.
- [10] 张建平, 成国梁, 周廷君, 等. 基于 BRM 下白光 OLED 恒定与步进应力加速寿命试验研究[J]. 液晶与显示, 2012, 27(2): 187-192.
Zhang J P, Cheng G L, Zhou T J, *et al.* Constant-step stress accelerated life tests of white OLED by BRM [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2012, 27(2): 187-192. (in Chinese)
- [11] 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.
Mao S S. The accelerated model of accelerated life test [J]. *Quality and Reliability*, 2003(2): 15-17. (in Chinese)

作者简介:张建平(1972—),男,江苏南京人,博士后,教授,研究生导师,主要从事机电产品寿命预测与可靠性分析、新能源装置中关键部件的力学行为分析、电磁除尘技术、储能技术等方面的研究。E-mail: jpzhanglzu@163.com