

功率型 LED 光通维持寿命的预测

陈超中 李为军 施晓红 王晔

(上海市质量监督检验技术研究院、国家电光源质量监督检验中心(上海)、国家灯具质量监督检验中心、上海时代之光照明电器检测有限公司, 上海200233)

摘要: 介绍了 LED 光输出寿命的预测模型, 引入数理统计学的基本原理并采用一元线性回归公式, 分析解读了 LM-80 报告与 LED 光通维持寿命预测图。揭示出 LED 光输出寿命的预测建立在至少 6000h 检验的数理统计学的基础上, 对于 LED 可靠性研究具有一定的现实意义。

关键词: LED; 光通量; 光通维持寿命; 线性回归分析

Lumen Maintenance Lifetime prediction of power LED

Chen Chaozhong, Li Weijun, Shi Xiaohong & Wang Ye

(Shanghai Institute of Quality Inspection and Technical Research; National Center of Supervision & Inspection on Electric Light Source Quality (Shanghai); China National Lighting Fitting Quality Supervision Testing Center (CLTC); Shanghai Alphas Lighting Equipment Testing Ltd.(SALT))

Abstract: The estimation lifetime model of power LEDs was analyzed at first, at the same time, LM-80 reports and chart estimation of lumen maintenance data and L70 extrapolation were investigated based on the principles of mathematical statistics and the equation of linear regression. The results showed that using lumen maintenance data should be rested on the base of mathematical statistics at least 6000h testing time, which will be helpful to power LED reliability.

Keywords: LED; luminous flux; lumen maintenance lifetime; linear regression analysis

GaN 基 LED 作为一种新型光源近年来得到飞速发展，据国家统计局数据，全国路灯数量约在 9000 万盏。如果按每盏路灯 5000 元计算，整个市场规模将接近 5 千亿。虽然 GaN LED 照明有着节能、环保、高效和长寿命等诸多优点，但其可靠性方面的研究仍很缺乏。作为光源，LED 不仅在光效方面，同时在色温和显色性方面应全面评价，只讲光效，不管色温和显色指数是没有实用意义的。同样只讲光效，不讲光输出的流明维持寿命同样是没有实用意义的。LED 的理论寿命为 10 万小时，如果仍采用常规的正常额定应力下的寿命试验，很难对产品的寿命和可靠性做出较为客观的评价，如何科学地预测 LED 光通维持寿命，确保 LED 使用的可靠性，不仅需要建立预测模型，而且需要保证一定的试验时间，不能急于求成，而是要静心研究与试验，科学地预测。本文介绍了 LED 光输出寿命的预测模型，引入数理统计学的基本原理，采用一元线性回归公式并结合相关实测数据分析解读了 LM-80 报告与 LED 光通维持寿命预测图。揭示出 LED 光输出寿命的预测建立在至少 6000h 检验的数理统计学的基础上，对于 LED 可靠性研究具有一定的现实意义。

1、LED 光输出寿命预测模型

LED 光输出随时间的衰减曲线可用指数函数表示为：

$$\Phi = \Phi_0 \exp(-\alpha t) \cdots \cdots \cdots (1)$$

式中 Φ_0 为初始光通量， α 为衰减系数， t 为以小时为单位的光通维持时间。

公式 (1) 两边取对数得到：

$$\ln \Phi = \ln \Phi_0 - \alpha t \cdots \cdots \cdots (2)$$

从公式 (2) 可以看出， $\ln \Phi$ 和光通维持时间 t 成线性关系，采用最小二乘法对试验数据进行光通维持寿命曲线的拟合。

根据公式 (2)，可以得到光通维持时间 t ：

$$t = -\ln(\Phi/\Phi_0)/\alpha \cdots \cdots \cdots (3)$$

假如 $t = L_{70}$ ， L_{70} 即为 70% 光通维持时间。

$$t = L_{70} = -\ln(70\%)/\alpha \cdots \cdots \cdots (4)$$

额定光通维持寿命 (L_p)：制造商对于特定型式的 LED 光源指定的寿命值。额定光通维持寿命 (L_p) 定义为 LED 光源维持它的光通量为初始光输出的 p 百分数的实际工作时间。例如： L_{70} (小时)：70% 光通维持时间； L_{50} (小时)：50%

光通维持时间。而 70%光通维持的光输出是接近人眼能够探测到光输出减少的阈值。

2、回归分析

为了对加速寿命 LED 照明产品进行快速合理的评价，一元线性回归方程 $\tilde{y}=a+b$ 被引进，其中，斜率 b 为回归系数。一般用样本 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots,$

(x_n, y_n) 来估计 a, b ，而得到估计 $\hat{a}, \hat{b}$ （这时 $\hat{a}, \hat{b}$ 皆为随机变量，它

们的取值是随样本而变的），因而得到理论回归方程 $\tilde{y}=a+b x$ 的一个估计：

$\hat{y}=\hat{a}+\hat{b} x$ ，称为经验回归方程（回经验公式），有时也简称为回归方程，它所

代表的直线称为经验回归直线（简称回归直线）。

a) 用最小二乘法估计 a, b

假设 n 个点 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ ，它们应该在理论回归直线

$$\tilde{y}=a+b x \cdots \cdots \cdots (5)$$

附近散布着。(4) 式中的 a, b 在理论上是完全确定的。为了寻求 a, b 的值，我们考虑一个 a, b 可以任意变动的直线族：

$$\tilde{y}=a+b x$$

然后选择一条直线 l ，使这 n 个点同直线 l 平均来说最为“接近”，我们就用直线 l 所对应的 a, b 值作为 (5) 式 a, b 的估计值。

用最小二乘法求得经验回归方程

$$\hat{y}=\hat{a}+\hat{b} x \cdots \cdots \cdots (6)$$

对于一组样本观测值 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ ，经验回归直线总通过散点图的几何中心 $(\bar{x}, \bar{y})$ ，即

$$\bar{y} = \hat{a} + \hat{b} \bar{x} \dots\dots\dots (7)$$

从理论上可以证明 $\hat{b}$ 、 $\hat{a}$ 分别是b、a的无偏估计，而且是用y的线性函数作无偏估计中方差最小的。

记

$$l_{xx} = \sum (x_i - \bar{x})^2 \dots\dots\dots (8)$$

$$l_{xy} = \sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \dots\dots\dots (9)$$

$$l_{yy} = \sum (y_i - \bar{y})^2 \dots\dots\dots (10)$$

l_{xx} 、 l_{yy} 分别为 x 、 y 的离差平方和， l_{xy} 为 x 、 y 的离差乘积和。具体进行数值计算时，也常常使用下列公式

$$l_{xx} = \sum x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum x_i)^2 \dots\dots\dots (11)$$

$$l_{xy} = \sum x_i y_i - \frac{1}{n} (\sum x_i)(\sum y_i) \dots\dots\dots (12)$$

$$l_{yy} = \sum y_i^2 - \frac{1}{n} (\sum y_i)^2 \dots\dots\dots (13)$$

$$\hat{b} = \frac{l_{xy}}{l_{xx}} \dots\dots\dots (14)$$

b) 相关系数与回归显著性检验

$$Q = \sum (y_i - \hat{y}_i)^2 \dots\dots\dots (15)$$

$$U = \sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \dots\dots\dots (16)$$

$$l_{yy} = Q + U \dots\dots\dots (17)$$

Q 为残差平方和， U 为回归平方和。 l_{yy} 可以表示为两个平方和之和，此式常称为平方和分解公式。

$$r = \frac{l_{xy}}{\sqrt{l_{xx}}\sqrt{l_{yy}}} = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum(y_i - \bar{y})^2}} \dots\dots\dots (18)$$

r 为相关系数

$$\frac{U}{l_{yy}} = \frac{\hat{b}^2 l_{xx}}{l_{yy}} = \left(\frac{l_{xy}}{l_{xx}}\right)^2 \cdot \frac{l_{xx}}{l_{yy}} = \frac{l_{xy}^2}{l_{xx} \cdot l_{yy}} = r^2 \dots\dots\dots (19)$$

r^2 代表了回归平方和 U 占总离差平方和 l_{yy} 的比率。例如, $r=0.9$, 则 $r^2=0.81$, 即 U 占 l_{yy} 的 81%, Q 占 l_{yy} 的 19%。

c) 相关系数 r 的几何意义

1) $r=0$ 。此时 $l_{xy}=0$, 因而 $\hat{b}=0$, 回归直线平行于 x 轴, 这说明 y 的变化与 x 无关, 此时 x 与 y 毫无线性关系。

2) $0 < |r| < 1$ 。这是绝大多数情形。这是 x 与 y 之间存在着一定的线性关系。

a) $r > 0$ 时, $b > 0$, 散点的纵坐标 y 有随着 x 增加而增加的趋势, 此时称 x 与 y 正相关。

b) $r < 0$ 时, $b < 0$, 散点的纵坐标 y 有随着 x 增加而减少的趋势, 此时称 x 与 y 负相关。

3) $|r|=1$ 。此时 $U=l_{yy}$, $Q=0$, 即所有的点都在回归直线上, 此时称 x 与 y 完全线性关系。当 $r=1$ 时, 称为完全正相关; 当 $r=-1$ 时, 称为完全负相关。

3、LM-80 报告的解读

北美照明学会会有一个出版物 LES LM-80-08《测量 LED 光源光通维持批准的方法》, 该出版物对试验温、湿度的要求是: 在做光度测量之间 LED 光源要工作在三个基座温度 T_s 中的最小温度值, 使用相同的驱动电流。三个基座温度 T_s 应

是：55℃、85℃还有一个制造商选择的温度。由制造商选择的基座温度和驱动电流应代表顾客应用场所对它们的预期，并应在推荐的工作温度范围内。在寿命试验中基座温度应控制到-2℃范围内，在试验周围环境空气温度应保持在基座温度-5℃范围内。整个寿命试验期间相对湿度应小于 65%。该出版物对光通维持试验时间和间隔的要求是：在规定的环境温度下至少工作 6000h，至少每 1000h 采集一次数据。为改进预期的模型最好工作 10000h。

而根据美国能源部（DOE）关于固态照明产品（SSL）能源之星的寿命阈值要求，如果 6000h 最小流明维持率为 91.8%，则最大声称寿命 $L_{70}=25000h$ 。如果 6000h 最小流明维持率为 94.1%，则最大声称寿命 $L_{70}=35000h$ 。而且，能源之星所公布的数据同样适用于其它功率的 LED。

下面列举一个基座温度 $T_s=85^{\circ}C$ 运用数理统计学的基本原理和采用一元线性回归公式对 LM-80 报告例子予以解读。

（a）表 1 输出光通量

表 1 为输出光通量，第一列表示 LED 试验样本有 80 个，第二列开始为 0h、24h、48h、96h、168h、500h、720h、1000h、1500h、2000h、3000h、4000h、5000h 和 6000h 测得的输出光通量的数据，试验时的应力条件为：85℃，0.35A， $T_s=85^{\circ}C$ ， $T_a=84^{\circ}C$ (T_a 为环境温度)。

（b）表 2 以 24h 输出光通量归一化的数据

将表 1 中的各数据除以 24h 的光通量数据得表 2，24h 被认为 LED 已处于工作稳定状态，表 2 中 1000h 至 6000h 指数外推计算出每一个 LED 样本的 α 、B、 r^2 和 L_{70} 值。使用公式（11）、公式（12）和公式（14）得出 $\hat{b}$ （相当于表 2 中 α ），通过公式（6）得出 $\hat{a}$ （相当于表 2 中 B），公式（11）、公式（12）、公式（13）和公式（19）可以得出 r^2 ，通过公式（4）得到每个样本的 L_{70} 值。在对退化曲线作回归拟合时，为减少误差，需做必要的修正，例如对于在低应力试验初期 Φ/Φ_0 可能大于 1 的情况，ASSIST 建议取第 1000h 的作为 Φ_0 ；而高应力试验初期， Φ/Φ_0 会偏离指数函数，在拟合时可以加权处理。

(c) 表 3 24h 输出光通量归一化数据的统计

第一列是统计量，它们是样本数、样本中位数、样本均值、标准差、最小值和最大值。

1) 样本

样本来自总体并且代表和反映总体。

2) 样本中位数

样本中位数，记作 $\tilde{X}$ ，它的定义为

$$\text{当 } n=2k+1 \text{ 时, } \tilde{X} = X_{(k+1)}, \text{ 或当 } n=2k \text{ 时, } \tilde{X} = \frac{1}{2}(X_{(k)} + X_{(k+1)})$$

3) 样本均值

样本均值 $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$ ，可以表示样本的位置特征。

4) 样本标准差

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(X_i - \bar{X} \right)^2$$

S^2 为样本方差，表示样本的离散性特征等等。一般取 S^2 为 σ^2 的估计量。样本方差的算术平方根叫做样本标准差，用 σ 表示。样本方差和样本标准差都是衡量一个样本波动大小的量，样本方差或样本标准差越大，样本数据的波动就越大。

5) 样本极差

最大值与最小值之差为样本极差（简称极差），记为 R ，其定义为

$$R = X_{\max} - X_{\min}。$$

如上述表 2 的计算所述，根据样本均值，通过公式 (7)，可以求得 n 个样本的 α 、 B 、 r^2 和 $L70$ 值。

根据公式 (18)， $r = \frac{l_{xy}}{\sqrt{l_{xx}}\sqrt{l_{yy}}} = -0.9368 < 0$ ，又 $\alpha = -5.1058E-06 < 0$ ，散点的纵

坐标 y 有随着 x 增加而减少的趋势，即 x 与 y 负相关。

表 1 输出光通量(lm)

样本号	时间 (h)													
	0	24	48	96	168	500	720	1000	1500	2000	3000	4000	5000	6000
1	53.113	52.715	52.203	52.118	52.365	52.440	52.310	52.108	51.899	52.454	51.070	50.730	50.365	50.464
2	52.811	52.523	52.127	51.919	52.133	52.175	52.173	52.020	51.806	52.408	51.609	51.035	51.102	50.790
.....														
80	51.434	50.933	50.569	50.059	50.512	50.572	49.774	49.605	50.038	49.835	49.370	48.923	49.451	49.153
上述试验条件： 应力：85℃，0.35A Ts=85℃ Ta=84℃														

表 2 24h 输出光通量归一化的数据

样本号	时间 (h)														1000h 至 6000h 指数外推			
	0	24	48	96	168	500	720	1000	1500	2000	3000	4000	5000	6000	α	B	r^2	L70
1	1.008	1.000	0.990	0.989	0.993	0.995	0.992	0.988	0.985	0.995	0.969	0.962	0.955	0.957	-7.884E-06	0.9983	0.8286	45241
2	1.005	1.000	0.992	0.989	0.993	0.993	0.993	0.990	0.986	0.998	0.983	0.972	0.973	0.967	-5.252E-06	0.9982	0.7809	67905
.....																		
80	1.010	1.000	0.993	0.983	0.992	0.993	0.977	0.974	0.982	0.978	0.969	0.961	0.971	0.965	-2.778E-06	0.9804	0.5084	128385
上述试验条件： 应力：85℃，0.35A Ts=85℃ Ta=84℃																		

表 3 24h 输出光通量归一化数据的统计

统计量	时间 (h)														指数模型估算, L70 外推			
	0	24	48	96	168	500	720	1000	1500	2000	3000	4000	5000	6000				
样本数	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	α	B	r^2	L70
样本中位数	1.005	1.000	0.993	0.988	0.993	0.993	0.992	0.988	0.984	0.985	0.968	0.961	0.967	0.960				
样本均值	1.004	1.000	0.993	0.988	0.992	0.993	0.990	0.986	0.985	0.981	0.970	0.964	0.967	0.962				
标准差	0.006	0.000	0.001	0.003	0.004	0.004	0.009	0.009	0.005	0.014	0.009	0.008	0.009	0.008				
最小值	0.979	1.000	0.990	0.978	0.977	0.978	0.970	0.960	0.974	0.945	0.947	0.955	0.942	0.952				
最大值	1.012	1.000	0.997	1.001	1.006	1.009	1.013	1.010	1.007	1.004	0.994	0.993	0.995	0.992				
上述试验条件: 应力: 85℃, 035A Ts=85℃ Ta=84℃																		

d) 图估法外推的 LM-80 LED 光通维持寿命预测图

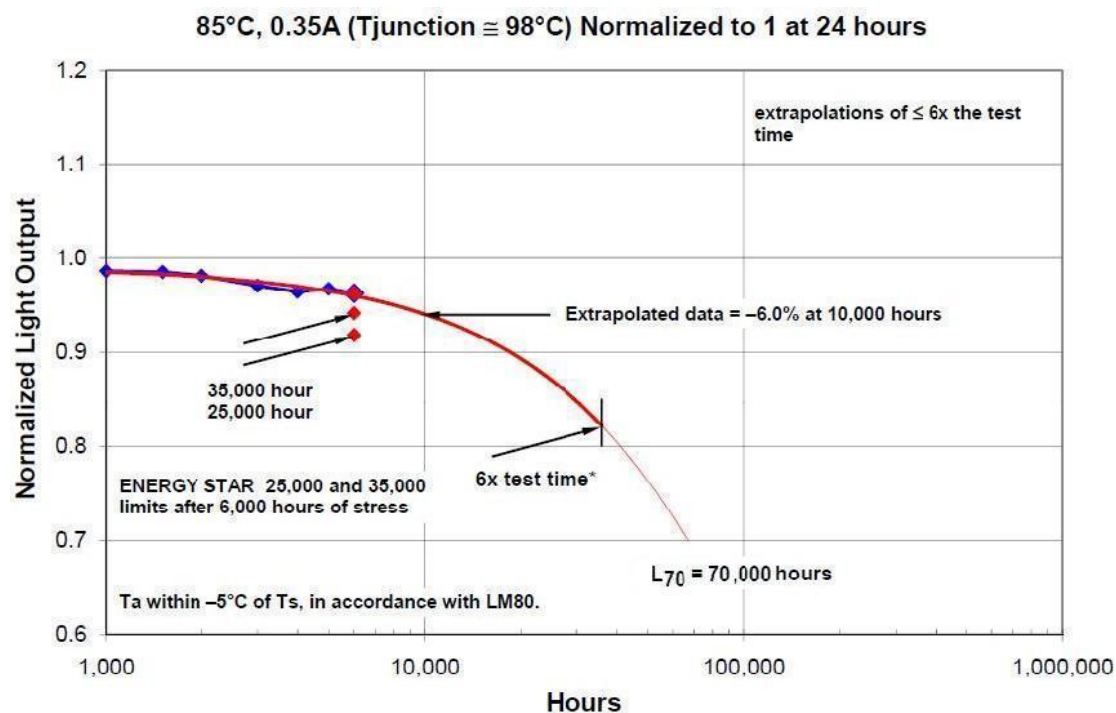


图 1 LED 光通维持寿命预测图

图 1 给出在在环境温度 85°C，外加 0.35A 电流条件下，根据 1000h、1500h、2000h、3000h、4000h、5000h 和 6000h 的光输出数据采集，用指数函数模型外推，计算得到 $L_{70}=69857$ 。而利用图估法外推 $\Phi/\Phi_0=0.7$ 时的使用寿命约为 70000 小时，两者得到的数据相差不大。但要注意的是，在对退化曲线作回归拟合时，为减少误差，需做必要的修正，例如对于在低应力试验初期 Φ/Φ_0 可能大于 1 的情况，ASSIST 建议取第 1000h 的作为 Φ_0 ；而高应力试验初期， Φ/Φ_0 会偏离指数函数，在拟合时可以进行加权处理。

4、结束语

加速寿命试验能够在较短时间内预测出 LED 产品正常应力条件下的寿命特征，是对功率 LED 照明产品长期使用可靠性进行评价的有效途径。本文介绍了 LED 光输出寿命的预测模型，并通过引入数理统计学的基本原理和一元线性回归公式分析解读了 LM-80 报告与 LED 光通维持寿命预测图。研究结果揭示出 LED 光输出寿命的预测应建立在至少 6000h 检验的数理统计学的基础上，对于 LED 可靠性研究具有一定的现实意义。

参考文献

- [1] 高金环等,“功率 LED 使用寿命评价”,《半导体技术》,2009/5,第 34 卷第 5 期
- [2] 李德高等,“大功率 LED 寿命的理想因子表征”,《液晶与显示》,2008/12,第 23 卷第 6 期
- [3] 马逢时等编,《应用概率统计(上册)》,高等教育出版社出版
- [4] DR03: LM-80 Test Report White LUXEON® Rebel
<http://www.philipslumileds.com/>
- [5] Lumen Maintenance Projection for White LXM3-PWx1 LUXEON Rebel under these conditions 85°C, 0.35A ($T_{\text{junction}} \approx 98^{\circ}\text{C}$) Normalized to 1 at 24 hours
<http://www.philipslumileds.com/>
- [6] IES LM-80-08 IES Approved Method for Measuring Lumen Maintenance of LED Light Sources
- [7] IES LM-80-08 《测量 LED 光源光通量维持批准的方法》介绍和说明,《光源与照明》增刊(2009)第 002 号
- [8] Technology White Paper, Understanding power LED lifetime analysis, Lumileds
- [9] Allan Horn, LED Reliability a complex, but crucial area, Jan, 2010, Lumileds