

光电产品的新型寿命预测模型及其应用

张建平¹, 宗雨¹, 朱文清², 易勳³

¹上海电力学院能源与机械工程学院, 上海 200090;

²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;

³浙江易鑫电子科技有限公司, 浙江 金华 321200

摘要 大多数现有的寿命预测模型在处理光电产品实验数据时存在耗时长、精度低等问题。为了短时间内准确地预测光电产品的寿命, 利用两参数威布尔函数拟合多组应力下的亮度衰减数据获得加速寿命, 通过拟合优度检验参数确定 Power 函数来外推常规寿命, 从而构建了一种新型的光电产品寿命预测模型: 加速寿命外推模型(ALEM)。将该模型应用于真空荧光显示屏(VFD)寿命的快速预测, 开展了 4 组恒定应力加速退化实验, 实现了模型精度的评价。结果表明, 设计的 VFD 加速退化实验方案正确可行, 采集的实验数据客观地反映了 VFD 亮度衰减特性; ALEM 准确地描述了加速应力下亮度的变化轨迹, 很好地揭示了应力随寿命变化的规律, 无需开展常规寿命实验便可精确地外推出产品的寿命, 为现代光电产品的寿命评估开辟了一种新的方法和途径。

关键词 光学器件; 寿命预测模型; 加速退化实验; 威布尔函数; Power 函数

中图分类号 TN383; TN141

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0223001

A Novel Model of Life Prediction for Photoelectric Products and Its Application

Zhang Jianping¹, Zong Yu¹, Zhu Wenqing², Yi Meng³

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

²Key Laboratory of Advanced Display and System Applications of EMC, Shanghai University, Shanghai 200072, China;

³Zhejiang Yi Xin Electronic Technology CO., LTD, Jinhua, Zhejiang 321200, China

Abstract Most existing life prediction models for photoelectric products have many problems such as time consuming and low precision in processing test data. In order to accurately predict the life of optoelectronic products in a short time, two-parameter Weibull function is used to fit luminance degradation data under multigroup stresses to obtain accelerated life, and Power function determined by the parameters of goodness-of-fit test is employed to extrapolate conventional life. Thereby, a novel model of life prediction, named accelerated life extrapolation model (ALEM), is established. The model is applied to rapidly predict the life of vacuum fluorescent display (VFD), accelerated degradation tests under four groups of constant stresses are carried out, and then the evaluation of the model precision is achieved. The results show that VFD test design scheme is correct and feasible, and the collected test data objectively reflect the characteristics of VFD luminance degradation. The ALEM exactly describes the change trajectory of luminance under each accelerated stress, well reveals the variation law of stress with life, and precisely extrapolates the product life without conducting conventional life test. Which can open up a new method and approach for the life estimation of modern optoelectronic products.

Key words optical devices; life prediction model; accelerated degradation tests; Weibull function; Power function

OCIS codes 230.2090; 230.0250; 130.0250

收稿日期: 2017-08-28; **收到修改稿日期:** 2017-09-24

基金项目: 国家自然科学基金(11572187)、上海市科学技术委员会项目(15110501000, 14DZ2261000)

作者简介: 张建平(1972—), 男, 博士, 教授, 主要从事机电产品寿命预测、能源安全技术与电力设备可靠性分析等方面的研究。E-mail: jpzhanglzu@163.com

1 引 言

光电产品因其光电转换效率高、耗能低,已成为市场上典型的节能产品。随着光电产品的产业化发展,市场需求越来越大,可靠性问题也日益突出。寿命作为一个重要的质量和可靠性指标^[1-2],在节省时间和成本的前提下,对光电产品进行准确的寿命预测是非常重要的且有意义的研究^[3]。因此,针对光电产品建立快速、准确、高效的寿命预测模型,是目前迫切需要开展的一项工作。

近年来一些研究人员已经在产品寿命预估方面进行了探索和研究,在寿命实验^[4-5]的基础上建立了多种寿命预估模型^[6-7]。目前,对于光电产品的寿命实验可以得到两种数据:一种是样品的失效数据;一种是产品某一性能的退化数据。对光电产品的寿命预测模型也可大致分为三类,第一类是概率统计模型,是一种较为传统的寿命预估模型,主要以产品失效时间作为分析数据^[8];第二类是性能退化模型,即利用产品某一性能退化的数据来外推得到寿命的模型^[9];第三类是概率统计和性能退化相结合的模型,通过性能退化数据外推样品的伪失效时间^[10-11],利用概率统计模型完成寿命预测。钱敏华等^[12]找到了输出光通量和寿命间的关系式,建立了基于LED光-电-热-寿命理论的寿命预测模型。黄伟明等^[13]基于LED芯片的理想因子、结温等参数,建立了反向传播(BP)神经网络寿命预测模型。Zhang等^[14]基于三参数威布尔函数和右逼近法建立亮度退化模型,准确地预测了大功率白光LED的寿命。Hu等^[15]基于Wiener随机过程建立了性能退化轨迹模型,对步进应力加速退化实验进行优化,以获得更为精确的模型参数。罗帅等^[16]利用有限元分析方法建立了变形镜在校正畸变波前过程中的应力分析模型,并结合Miner累积损伤理论分析了变形镜的疲劳特性。Wang等^[17]建立了基于Gamma退化过程的寿命预测模型,以碳膜电阻的加速退化实验数据进行了模型精度的验证。Oh等^[18]基于加速退化实验建立了光伏组件的潜在退化模型。

然而,在现有的光电产品寿命预测模型中,计算相对繁琐,工作量较大,寿命预测的效率和精度有待于进一步提高。迄今为止,直接借助于多组恒定应力加速退化实验数据预测寿命的模型未见相关报道。因此,本文针对光电产品建立了一种新型寿命预测模型——加速寿命外推模型(ALEM):直接利用实验样本在高应力水平下的亮度退化规律,外推

产品在正常应力水平下的寿命,无需借助常规寿命实验,且预测寿命周期短、效率高;基于完整的加速退化实验推算正常寿命,无需外推伪失效时间,且数据信息量大、预测精度高。

2 模型的构建

ALEM的基本构建思路如下:1)采用亮度衰减拟合函数——两参数威布尔函数拟合多组加速亮度衰减数据,从而得到每组应力下的加速寿命;2)通过常规寿命外推函数拟合加速应力和加速寿命的数据点,外推出常规应力下的寿命。

2.1 亮度衰减拟合函数

光电产品在加速退化实验中,亮度基本呈现非线性衰减的趋势。由于威布尔函数对于各种类型的实验数据拟合能力较强,因此,推导加速亮度衰减拟合函数时选择两参数威布尔函数,表达式为

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m\right], \quad t > 0, \quad (1)$$

式中 m 为形状参数, η 为尺度参数, t 为时间。

在(1)式中,令 $F(t) = 1 - \frac{D(t)}{D_0}$, 则光电产品的两参数威布尔亮度衰减函数可写为

$$D(t) = D_0 \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m\right], \quad (2)$$

式中 D_0 为产品初始时刻所测得的亮度, $D(t)$ 为产品在 t 时刻的亮度。

2.2 寿命外推函数

常规寿命可通过外推函数拟合由各加速应力 S 与对应的加速寿命 μ 形成的数据点 (S, μ) 而得到,这里分别采用指数函数、Power函数,可表示为

$$\mu = a \exp(bS), \quad (3)$$

$$\mu = cS^d, \quad (4)$$

式中 a, b, c, d 均为待定参数。

2.3 拟合优度检验

均方根误差 β 越小,说明模型的拟合效果越好,预测精度越高,公式如下:

$$\beta = \left[\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (y_j - \hat{y}_j)^2 \right]^{1/2}, \quad (5)$$

式中 y_j 为因变量的实测值, \hat{y}_j 为因变量的预测值, N 为观测值样本个数。

2.4 加速寿命计算

在ALEM中,每组加速应力记为 S_i ($i=1, 2, \dots, M$) (M 为实验应力的个数),若 S_i 下第 k ($k=1, 2, \dots, n_i$) 个实验样品在 j ($j=0, 1, 2, \dots, N_i$) 时刻 t_j 的亮度记为

$D_{ik}(t_j)$, 则该时刻 n_i 个实验样品的平均亮度 $D_i(t_j)$ 为

$$D_i(t_j) = \frac{1}{n_i} \sum_{k=1}^{n_i} D_{ik}(t_j), \quad (6)$$

由(6)式可得到每组应力下实验样品平均亮度衰减数据 $[t_j, D_i(t_j)]$ 。

结合(2)式, S_i 下的平均亮度 $D_i(t)$ 随时间变化关系可写为

$$D_i(t) = D_{i0} \exp \left[- \left(\frac{t}{\eta_i} \right)^{m_i} \right], \quad (7)$$

式中 D_{i0} 为产品在 S_i 下初始时刻测得的平均亮度。根据最小二乘法(LSM)原理^[14], 结合实验数据 $[t_j, D_i(t_j)]$, 可计算出(7)式中的形状参数 m_i 和尺度参数 η_i , 从而确定拟合亮度衰减曲线的威布尔公式。

记 D_{if} 为产品在加速应力 S_i 下失效时的亮度, 在(7)式中令 $D_i(t) = D_{if}$, 整理后即可得到产品在加速应力 S_i 下的加速寿命 μ_i , 即为

$$\mu_i = t = \eta_i \left(\ln \frac{D_{i0}}{D_{if}} \right)^{\frac{1}{m_i}}. \quad (8)$$

2.5 建模流程

首先, 采用(7)式描述平均亮度衰减数据 $[t_j, D_i(t_j)]$, 利用 LSM 确定(8)式, 从而可得到每个加速应力 S_i 下加速寿命 μ_i 。其次, 分别采用指数外推函数、Power 外推函数拟合数据点 (S_i, μ_i) , 结合 LSM 确定(3)、(4)式以及对应决定系数 R_e^2 与 R_p^2 , 并利用(5)式计算对应的均方根误差 β_e 和 β_p , 通过对比得到最优的外推函数。最后, 将常规应力 S_0 代入上步确定的最优外推函数中, 完成常规寿命 μ_0 的预测。具体寿命预测流程如图 1 所示。

3 模型的应用

为了分析 ALEM 的精度, 研究以真空荧光显示屏(VFD)为样品设计了实验方案, 开展了 4 组恒定应力加速退化实验, 采集了亮度衰减实验数据, 并利用 ALEM 对其进行处理, 从而外推得到了 VFD 的常规寿命。

3.1 VFD 实验方案设计

3.1.1 加速应力的选取及失效标准

阴极灯丝温度 T 作为影响 VFD 寿命的主要因素, 被选为加速退化实验的加速应力 S 。VFD 正常工作时的灯丝温度为 $650\text{ }^\circ\text{C}$, 保持失效机理不变的最高灯丝温度不超过 $850\text{ }^\circ\text{C}$ 。为了提高实验的准确性, 4 组温度应力水平分别选为: $T_1 = 1023.00\text{ K}$, $T_2 = 1055.56\text{ K}$, $T_3 = 1087.85\text{ K}$, $T_4 = 1123.33\text{ K}$, 该型号 VFD 灯丝正常工作温度为 $T_0 = 923.95\text{ K}$ 。

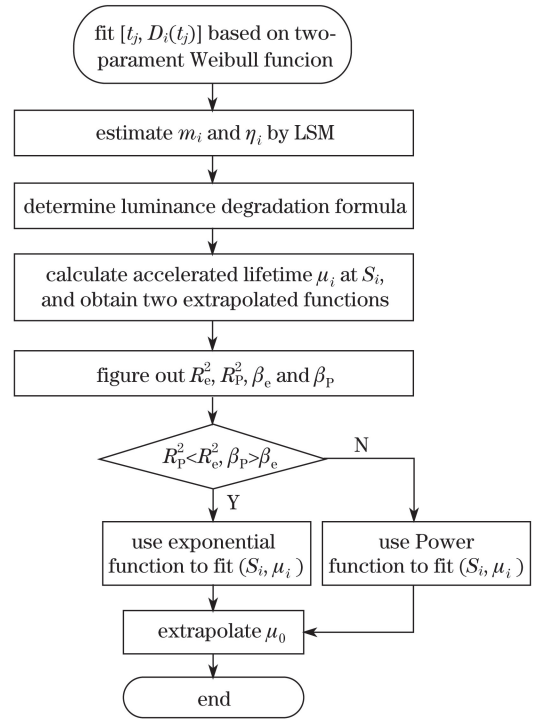


图 1 寿命预测模型流程图

Fig. 1 Flow chart of life prediction model

在正常测试条件下, 目前 VFD 行业认定产品测试位亮度低于最低亮度标准 (350 cd/m^2) 的 60%, 即 210 cd/m^2 时产品失效。

3.1.2 实验样品及数量的选取

按照国家标准 GB 2689.1—1981 以及选定的加速应力, VFD 实验样品分成 4 组, 每个应力水平下样品数为 20 个, 即 $n_1 = 20, n_2 = 20, n_3 = 20, n_4 = 20$, VFD 寿命实验台如图 2 所示。



图 2 VFD 寿命实验台

Fig. 2 Life test platform of VFD

3.2 亮度衰减实验数据

根据上述实验方案, 获得了 4 组应力下每个样品的亮度衰减数据, 基于(6)式可计算每组应力下 VFD 实验样品平均亮度随时间的衰减数据 $[t_j, D_i(t_j)]$, 列于表 1。

表 1 各应力下 VFD 平均亮度随时间衰减的数据

Table 1 Data of the average luminance of VFD attenuating with time under each stress

j	$T_1=1023.00\text{ K}$		$T_2=1055.56\text{ K}$		$T_3=1087.85\text{ K}$		$T_4=1123.33\text{ K}$	
	t_j/h	$D_1(t_j)/(\text{cd}\cdot\text{m}^{-2})$	t_j/h	$D_2(t_j)/(\text{cd}\cdot\text{m}^{-2})$	t_j/h	$D_3(t_j)/(\text{cd}\cdot\text{m}^{-2})$	t_j/h	$D_4(t_j)/(\text{cd}\cdot\text{m}^{-2})$
0	0	1515.83	0	1468.12	0	1490.73	0	1492.65
1	238	879.09	46	1051.22	46	805.85	22	749.11
2	332	734.51	92	809.91	92	576.09	44	516.09
3	426	653.41	138	678.92	138	432.35	66	358.80
4	520	572.09	184	596.36	206	297.28	88	249.65
5	614	526.12	230	523.61	228	261.15	110	160.32
6	708	485.70	276	465.20	250	223.86	132	98.80
7	802	440.95	322	411.23	272	199.22		
8	896	406.15	368	364.06	294	178.36		
9	990	377.76	414	331.06	316	155.80		
10	1084	348.58	460	298.62	338	132.40		
11	1178	322.23	482	280.70				
12	1272	305.19	504	268.54				
13	1366	273.80	526	264.92				
14	1454	265.02	548	249.29				
15	1542	242.49	570	232.89				
16	1630	225.99	592	225.45				
17	1718	211.16	614	215.44				
18	1806	191.06	636	207.28				
19	1894	178.44	658	195.48				
20	1982	165.91	680	189.73				
21	2048	153.11	702	180.36				
22			724	170.17				
23			746	163.27				
24			768	154.13				

3.3 寿命的预测

利用(7)式描述表 1 中各应力下的平均亮度衰减数据 $[t_j, D_i(t_j)]$, 结合 LSM 可得到形状参数

m_i 、尺度参数 η_i 和拟合决定系数 R_i^2 , 如表 2 所示。此外, 实验所测得的 VFD 每组应力下初始平均亮度 D_{i0} 一并列于表 2 中。

表 2 各应力下亮度衰减公式中的参数

Table 2 Parameters in the formula of luminance attenuation under each stress

Parameter	$T_1=1023.00\text{ K}$	$T_2=1055.56\text{ K}$	$T_3=1087.85\text{ K}$	$T_4=1123.33\text{ K}$
$D_{i0}/(\text{cd}\cdot\text{m}^{-2})$	1515.83	1468.12	1490.73	1492.65
m_i	0.6302	0.6477	0.6814	0.7555
η_i	577.2547	222.3388	97.7008	38.5721
R_i^2	0.9970	0.9976	0.9974	0.9893

将表 2 中每组应力下的各参数分别代入到(7)式, 可得到 4 组应力下 VFD 亮度 $D_i(t)$ 的衰减公式:

$$\begin{cases} D_1(t) = 1515.83 \exp\left[-\left(\frac{t}{577.2547}\right)^{0.6302}\right] \\ D_2(t) = 1468.12 \exp\left[-\left(\frac{t}{222.3388}\right)^{0.6477}\right] \\ D_3(t) = 1490.73 \exp\left[-\left(\frac{t}{97.7008}\right)^{0.6814}\right] \\ D_4(t) = 1492.65 \exp\left[-\left(\frac{t}{38.5721}\right)^{0.7555}\right] \end{cases} \quad (9)$$

根据(9)式, 将 4 组加速应力下 VFD 的亮度随时间衰减的曲线绘于图 3。不难看出, VFD 平均亮度实验数据随时间的增加呈非线性衰减的趋势, 且伴随实验应力的升高, 亮度衰减的幅度也越来越大, 符合光电产品亮度衰减特征, 这足以说明实验所测试的亮度数据能充分反映 VFD 亮度衰减特性规律, 实验方案切实可行。此外, 各应力下的实验数据点与对应的拟合曲线吻合程度较高, 且拟合决定系数均接近于 1, 这表明威布尔函数拟合曲线较为准确地描述了 VFD 亮度随时间的变化关系, ALEM 在计算加速寿命时精度较高。

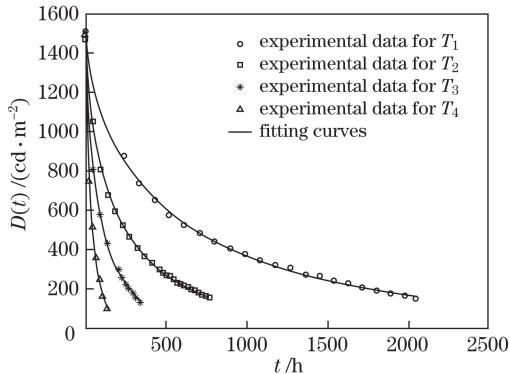


图 3 平均亮度衰减数据及其威布尔拟合曲线
Fig. 3 Average luminance attenuation data and corresponding Weibull fitting curves

在(8)式中, 令 VFD 失效亮度 $D_{if} = D_f = 210 \text{ cd/m}^2$, 并利用表 2 中相应参数, 可计算出 4 组应力下的加速寿命, 分别为: $\mu_1 = 1701.8 \text{ h}$, $\mu_2 = 620.8 \text{ h}$, $\mu_3 = 262.3 \text{ h}$, $\mu_4 = 94.1 \text{ h}$ 。

3.3.2 VFD 常规寿命的外推

基于上述计算结果, 可获得 4 组加速应力与加速寿命的数据点: $(1023.00, 1701.8)$, $(1055.56, 620.8)$, $(1087.85, 262.3)$ 和 $(1123.33, 94.1)$, 分别采用指数外推函数(3)式、Power 外推函数(4)式拟合这组数据点, 利用 LSM 确定待定参数 $a = 3.56 \times 10^{16}$ 、 $b = -0.03$ 与 $c = 6.47 \times 10^{97}$ 、 $d = -31.42$, 求出

决定系数 R_e^2 与 R_p^2 , 并结合(5)式计算出均方根误差 β_e 和 β_p , 各拟合优度检验参数均列于表 3。可以看出, $R_p^2 > R_e^2$ 且 $\beta_p < \beta_e$, 可知基于 Power 函数估算常规寿命的精度更高, 可表示为

$$\mu = 6.471 \times 10^{97} \times S^{-31.42} \quad (10)$$

表 3 基于外推函数的拟合优度检验参数

Table 3 Parameters of goodness-of-fit test based on extrapolated functions

R_e^2	R_p^2	β_e	β_p
0.9995	0.9997	29.1611	21.8637

Power 函数外推常规寿命的拟合曲线如图 4 所示。不难看出, 数据点均大致落在拟合曲线上, 说明拟合公式(10)式能精确表示实验应力对 VFD 产品寿命的影响关系; 拟合决定系数 $R_p^2 = 0.9997$, 非常接近于 1, 表明 Power 函数拟合精度较高, 外推的常规寿命较准确。

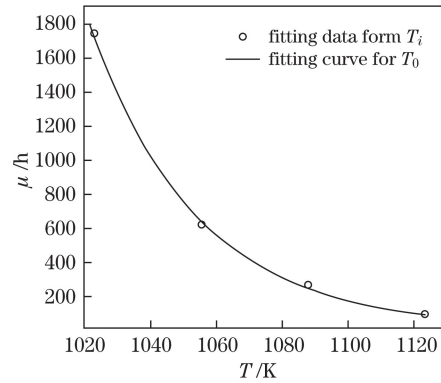


图 4 Power 函数拟合加速寿命和加速应力的曲线
Fig. 4 Fitting curve of accelerated life and accelerated stress by Power function

因此, 将常规应力 $T_0 = 923.95 \text{ K}$ 代入(10)式可计算出 VFD 常规寿命 $\mu_0 = 41686.5 \text{ h}$ 。

4 模型的精度

研究预估的 VFD 常规寿命在 40000 h 左右, 与几十年来 VFD 用户反馈的实际使用寿命相符。然而, 传统的光电产品亮度衰减数据的拟合大都是通过指数函数来实现的^[10-12], 为了进一步论证 ALEM 确实提高了寿命预测的精度, 依照 ALEM 的寿命预测方法两次采用指数函数估算了 VFD 的常规寿命, 预测结果为 $\mu_e = 47092.2 \text{ h}$ 。将 μ_e 、所提 ALEM 预测的 μ_0 分别与文献[19]中的 VFD 寿命 μ_1 进行对比, 如表 4 所示。可以看出, ALEM 的寿命预测相对误差仅为 1.81%, 远低于指数函数的 10.92%, 表明所提新型 ALEM 在预测 VFD 寿命方面具有较高

的精度。

表 4 寿命对比
Table 4 Life comparison

Item	μ_0	μ_e	μ_1
Lifetime /h	41686.5	47092.2	42457.1
Relative error /%	1.81	10.92	—

5 结 论

基于光电产品在多组加速应力下的亮度衰减特性、寿命与应力的变化关系,构建了一种新型的 ALEM,并将该模型成功应用于 VFD 寿命预测,得到结论如下:

1) 4 组恒定应力下的 VFD 加速退化实验最长测试时间为 2048 h,与 40000 h 左右的常规寿命相比,大幅度缩短了实验测试时间,克服了常规寿命实验成本高、周期长等问题。

2) 两参数威布尔亮度衰减函数很好地揭示了亮度随时间变化的规律,准确地计算了各应力下的加速寿命,提升了新型 ALEM 的精度。

3) Power 函数准确而又直观地描述了加速应力水平下的寿命特征,直接外推出常规寿命的方法,避免了常规寿命实验的开展,使得复杂的寿命预测过程变得简单,提高了寿命预测的效率,大大降低了预测寿命的误差。

4) 从 VFD 寿命的预测过程和结果来看,ALEM 具有精度高、可行性好、快速高效等特点,进一步改进了光电产品寿命预测方法,完善了寿命预测的理论体系。

参 考 文 献

- [1] Le H Y, Li C R, Li Y, *et al.* Reliability design and simulation test for the optic-electronic products[J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(3): 291-296.
乐洪宇,李朝荣,李永,等.光电产品的可靠性设计与仿真实验[J].*激光与红外*, 2013, 43(3): 291-296.
- [2] Ignacio V, Isidro L A, Juan A. Reliability analysis of LED-based electronic devices[J]. *Procedia Engineering*, 2012, 35: 260-269.
- [3] Xiao C D, Liu C J, Liu W D, *et al.* Reliability assessment of LED lamp based on acceleration degradation test[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2014, 35(9): 1143-1151.
肖承地,刘春军,刘卫东,等.基于加速性能退化的 LED 灯具可靠性评估[J].*发光学报*, 2014, 35(9): 1143-1151.
- [4] Pellizzi E, Lattuat-Derieux A, Lavédrine B, *et al.*

Degradation of polyurethane ester foam artifacts: chemical properties, mechanical properties and comparison between accelerated and natural degradation[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2014, 107: 255-261.

- [5] Mohammadian S H, Ait-Kadi D, Routhier F. Quantitative accelerated degradation testing: practical approaches[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2010, 95(2): 149-159.
- [6] Qu X, Wang H, Zhan X, *et al.* A lifetime prediction method for LEDs considering real mission profiles[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017, 32(11): 8718-8727.
- [7] Ao D, Hu Z, Mahadevan S. Design of validation experiments for life prediction models[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2017, 165: 22-33.
- [8] Meeker W Q, Escobar L A. Statistical methods for reliability data[M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1998: 316-340.
- [9] Chao D H, Ma J, Zhang C X. Reliability assessment of superluminescent diodes from performance degradation data[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(10): 3044-3048.
晁代宏,马静,张春熹.基于性能退化数据的超辐射发光二极管可靠性评估研究[J].*光学学报*, 2010, 30(10): 3044-3048.
- [10] 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.
- [11] Wang F K, Lu Y C. Useful lifetime analysis for high-power white LEDs[J]. *Microelectronics Reliability*, 2014, 54(6/7): 1307-1315.
- [12] Qian M H, Lin Y D, Sun Y J. Life prediction model for LEDs based on the photo-electro-thermal-life theory[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(8): 0823001.
钱敏华,林燕丹,孙耀杰.基于光-电-热-寿命理论的 LED 寿命预测模型[J].*光学学报*, 2012, 32(8): 0823001.
- [13] Huang W M, Wen S S, Xia Y Y. Reliability model of LEDs based on artificial neural network[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2015, 36(8): 962-968.
黄伟明,文尚胜,夏云云.基于 BP 神经网络的 LED 可靠性模型研究[J].*发光学报*, 2015, 36(8): 962-968.
- [14] Zhang J P, Chen W L, Wang C, *et al.* An improved modeling for life prediction of high-power white LED based on Weibull right approximation method[J]. *Microelectronics Reliability*, 2016, 59: 49-54.
- [15] Hu C H, Lee M Y, Tang J. Optimum step-stress accelerated degradation test for Wiener degradation

- process under constraints[J]. *European Journal of Operational Research*, 2015, 241(2): 412-421.
- [16] Luo S, Chen L X, Zhang B. Influence of structural parameters of deformable mirror on its fatigue life[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(10): 1001003.
罗帅, 陈丽霞, 张彬. 变形镜的结构参数对其疲劳寿命的影响[J]. *光学学报*, 2017, 37(10): 1001003.
- [17] Wang H W, Xu T X, Mi Q L. Lifetime prediction based on Gamma processes from accelerated degradation data[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2015, 28(1): 172-179.
- [18] Oh W, Bae S, Chan S, *et al.* Field degradation prediction of potential induced degradation of the crystalline silicon photovoltaic modules based on accelerated test and climatic data[J]. *Microelectronics Reliability*, 2017, 76/77: 596-600.
- [19] Zhang J P, Wang R T. Reliability life prediction of VFD by constant temperature stress accelerated life tests and maximum likelihood estimation[J]. *Journal of Testing and Evaluation*, 2009, 37(4): 316-320.