【文章编号】 1004-1540(2009)04-0338-04

威布尔分布的环保型电子节能灯寿命的极大似然估计

刘　恒，张树生，左建生
（中国计量学院 机电工程学院，浙江 杭州 310018）

【摘　要】 提出了一种利用改进的极大似然估计法对基于威布尔分布的环保型电子节能灯寿命数据进行分析的方法. 该方法利用加速寿命实验获取环保型电子节能灯使用寿命的数据，利用统计学的方法和威布尔分布模型，实现高应力下的实验时间的等效折算. 采用改进的极大似然估计，有益于对环保型电子节能灯的寿命数据进行分析.

【关键词】 环保型电子节能灯；威布尔分布；极大似然估计
【中图分类号】 O213.2　　【文献标识码】 A

Maximal likelihood estimate of life data of environment-protecting and energy-saving lights based on Weibull-distributing

LIU Heng, ZHANG Shu-sheng, ZUO Jian-sheng
(College of Electrical and Mechanical Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: A new method for the analysis of life data of environment-protecting and energy-saved lights based on Weibull-distributing by improved maximal likelihood estimate put forward. This method uses the life data of environment-protecting and energy-saving lights gained by accelerated life testing. It realizes equivalent-conversion of experimental time under the condition of high stress by using the method of statistics and the model of Weibull-distributing. The life data of environment-protecting and energy-saving lights by using improved maximal likelihood estimate is availability.

Key words: environment-protecting and energy-saving lights; accelerated life testing; Weibull-distributing; maximal likelihood estimate

环保型电子节能灯具以其高光效、节电、环保、寿命长的优异性能被誉为第三代新光源，并且在国内外得到了广泛的应用. 在全球气候变暖和绿色环保风暴等的作用下，2007 年 3 月 9 日欧盟春季首脑会议达成协议，伴随人类生活了百余年，由爱迪生发明的钨白炽灯，2009 年起将从欧

【收稿日期】 2009-09-18
【基金项目】 浙江省科技计划资助项目(No. 2008C2110)
【作者简介】 刘　恒(1984－)，男，河南漯河人，硕士研究生. 主要研究方向为检测技术及自动化装置.

盟开始熄灭.欧洲各国发起，全球将逐步用电子节能灯、LED等新光源取代能耗高的钨白炽灯，以节约能源，减少温室气体排放，改善人类生存环境；电子节能灯具的产量与使用率将大幅度增长.

我国是电子节能灯具的生产、出口大国，是全球最大的环保电子节能灯类产品生产出口基地，而浙江省电子节能灯的产量约占全国的40%.目前中国照明用电约占社会总用电量的12%，大部分光源(约87%)为低效照明的白炽灯.要建设节能环保型社会，必须采用高效清洁的照明产品替代传统的高能耗、有污染的产品.因此，我国已经启用了中国绿色照明工程，并将其作为环保领域的一项重大示范工程.

然而，国内市场上电子节能灯具的产品质量难以令人满意.据有关资料介绍，上海市行政执法部门近期对全市流通领域的电子节能灯进行了质量检测，检测结果显示，电子节能灯产品的总体合格率仅为64.4%，部分郊区市场销售的产品合格率还不到两成.据分析，电子节能灯的一大质量问题涉及产品寿命性能指标不达标.不合格的产品使用寿命短，有的仅几百小时就“寿终正寝”了，而合格的电子节能灯可使用数千小时甚至上万小时.对于各电子节能灯具生产企业而言，为了避免电子节能灯具产品的质量不合格，除了抓好原材料和生产环节外，建立先进的电子节能灯具检测系统显得尤为必要，尤其是先进的使用寿命快速检测系统.

然而面对电子节能灯动辄几千小时甚至上万小时的寿命，在生产过程中一般中小企业往往会忽略对产品进行完整寿命的检测；检测机构大多数也只按照相关标准考核2 000 h的光通维持率指标.因此，在符合检测标准的前提下，如何尽可能地减少试验时间和试验费用是当前急需解决的问题.由于快速检测技术可以解决生产后对产品使用寿命快速检测的要求，从而极大地提高生产和检测效率，使得很多机构和公司都在进行研究和探讨.快速检测技术是以加速寿命试验为基础进行的，如果我们能够研究出快捷高效的加速寿命检测技术，那么将具有很大的生产应用价值，对电子节能灯具生产行业也会有很大的推动作用.

综上所述，在质量意识日益增强的今天，对于电子节能灯生产企业而言，建立一套符合企业产品开发和生产急需的电子节能灯产品质量检测系统就显得非常重要，而且这种系统必须具备快速测试的能力.本文正是针对目前电子节能灯领域使用寿命质量问题的现状，对企业层面的电子节能灯具产品使用寿命检测技术开展应用研究，并建立系统的综合测试解决方案和企业自检技术系统，以保证产品质量符合出厂标准，同时努力促进电子节能灯具产品检测技术水品的提高[1].

1　寿命分布模型

威布尔分布是可靠性中常用的寿命分布，大量实验数据证明许多电子元件与设备的寿命分布都是威布尔分布，在对加速寿命实验中或得的环保型电子节能灯寿命数据进行极大似然估计时，我们选择威布尔分布模型作为应用模型[2].威布尔分布的分布函数与密度函数分别为

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

$$f(t)=\left(\frac{m}{\eta^{m}}\right)t^{m-1}\exp\left\{\frac{t^{\ m}}{\eta}\right\},\quad t\geqslant 0$$ [3]

它是含有两个参数的寿命分布，常记为$W(m,\eta)$，其中$\eta>0$是特征寿命，因为$\eta=t_{0.63}$，另一个参数$m>0$是形状参数.

威布尔分布的失效率函数容易算得

$$\lambda(t)=\frac{m}{\eta^{m}}t^{m-1},\quad t\geqslant 0$$

它是时间t的幂函数[4].

2　寿命数据的极大似然估计

目前，关于威布尔分布函数参数的确定方法中，极大似然函数法是一种十分有效和通用的参数估计方法.其基本思想是选择待定参数，使样本出现在观测值领域内的概率最大，并以这个值作为未知参数的点估计值.方法的前提条件是以不能低于5个试验样本数据作为支撑，样本数据越多，得到的模型越准确.

A1：本次实验采用定时截尾的方法进行，对n_i个产品在加速应力水平s_i下进行恒加实验，到事先规定的截尾时间t_i时停止实验，在$[0,t_i]$内失效r_i个产品，失效时间分别服从威布尔分布，其分布函数为[6]

$$F_i(t)=1-\exp\left\{-\left(\frac{t}{\eta_i}\right)^{m_i}\right\},\quad i=0,1,\cdots\cdots,k$$

其中诸 $m_i>0$ 为形状参数,诸 $\eta_i>0$ 为特征寿命.此假定表明,应力水平改变是不会改变寿命分布类型.

A2:在 s_0 和 $s_1,\cdots\cdots,s_k$ 下产品的失效机理不变.由于威布尔分布的形状参数反映失效机理,故此假定意味着

$$m_0=m_1=\cdots\cdots=m_k$$

A3:产品的特征寿命 η_i 与所加的应力水平 s_i 间有如下的加速模型[7]

$$L_n\eta_i=a+b\phi(s_i),\quad i=0,1,\cdots\cdots,k$$

其中 a,b 是待估参数,$\varphi(s)$ 是应力 S 的已知函数.

在多次实验之后获取原始的实验数据,表1为整理后数据,因实验数据复杂,我们选取其中的9组数据进行分析:

表1 试验样品数据

Table 1 Test sample data

产品型号	样本数量	额定寿命(h)	单灯实验寿命/h 1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#
120-23MSL 65K	9	6 000	3 062	3 062	3 062	3 247	2 915	3 011	3 305	2 899	3 122
120-28MSL27K T3	9	6 000	3 064	3 064	3 064	3 174	2 913	3 174	2 877	2 893	3 233
220-23MSL 65K	9	6 000	3 084	3 084	2 000	2 578	3 009	3 174	2 786	2 913	3 211
230-20MSL27K T3	9	8 000	3 984	2701	3 215	3 524	3 247	3 321	3 071	3 023	3 412
230-15MSL65K T3	9	8 000	4 180	2 315	4 180	3 891	3 517	4 213	3 957	3 798	4 019
220-11MUL/327K	9	6 000	3 284	3 284	3 284	3 158	3 301	2 897	3 325	2 971	3 043

利用这些数据要求共同的 m 值和加速方程中参数 a,b 的极大似然估计,令 $\phi_i=\phi(s_i)$ 由加速方程知

$$L_n\eta_i=a+b\phi_i,\quad \eta_i=e^{a+b\phi_i}$$

$$\frac{\partial\eta_i}{\partial a}=\eta_i,\frac{\partial\eta_i}{\partial b}=\phi_i\eta_i$$ [8]

$$i=1,2,\cdots\cdots,k$$

求 m,a,b 极大似然估计的似然函数为

$$L(a,b,m)=\prod_{i=1}^{k}\prod_{j=1}^{r_i}\frac{n_i!}{(n_i-r_i)!}\frac{m}{\eta_i^m}t_{ij}^{m-1}\exp\left[-\left(\frac{t_{ij}}{\eta_i}\right)^m\right].\left\{\exp\left[-\left(\frac{t_i}{\eta_i}\right)^m\right]\right\}^{n_i-r_i}$$

对数似然函数为

$$L_nL=\sum_{i=1}^{k}\left[\ln\frac{n_i!}{(n_i-r_i)!}+r_i\ln m-mr_i\ln\eta_i+(m-1)\sum_{j=1}^{r_i}\ln t_{ij}\right]-\sum_{i=1}^{k}\left[\sum_{j=1}^{r_i}\left(\frac{t_{ij}}{\eta_i}\right)^m+(n_i-r_i)\left(\frac{\tau_i}{\eta_i}\right)^m\right]$$ [9]

令 $R=\sum_{i=1}^{k}r_i$,似然方程组为

$$\frac{\partial\ln L}{\partial m}=\frac{R}{m}-\sum_{i=1}^{k}r_i\ln\eta_i+\sum_{i=1}^{k}\sum_{j=1}^{r_i}\ln t_{ij}-\sum_{i=1}^{k}\left[\sum_{j=1}^{r_i}\left(\frac{t_{ij}}{\eta_i}\right)^m\ln\frac{t_{ij}}{\eta_i}+(n_i-r_i)\left(\frac{\tau_i}{\eta_i}\right)^m\ln\frac{\tau_i}{\eta_i}\right]=0$$

$$\frac{\partial\ln L}{\partial b}=-m\sum_{i=1}^{k}r_i\phi_i+m\sum_{i=1}^{k}\phi_i\left[\sum_{j=1}^{r_i}\left(\frac{t_{ij}}{\eta_i}\right)^m+(n_i-r_i)\left(\frac{\tau_i}{\eta_i}\right)^m\right]=0$$

由后面两个方程可得

$$\sum_{i=1}^{k}\left\{\left[\sum_{j=1}^{r_i}\left(\frac{t_{ij}}{\eta_i}\right)^m+(n_i-r_i)\left(\frac{\tau_i}{\eta_i}\right)^m\right]-r_i\right\}=0$$ [10]

$$\sum_{i=1}^{k}\phi_i\left\{\left[\sum_{j=1}^{r_i}\left(\frac{t_{ij}}{\eta_i}\right)^m+(n_i-r_i)\left(\frac{\tau_i}{\eta_i}\right)^m\right]-r_i\right\}=0$$

将此式带入第一个似然方程,化简后为

$$\frac{R}{m}+\sum_{i=1}^{k}\left[\sum_{j=1}^{r_i}\ln t_{ij}-\sum_{j=1}^{r_i}\left(\frac{t_{ij}}{\eta_i}\right)^m\ln t_{ij}-(n_i-r_i)\left(\frac{\tau_i}{\eta_i}\right)^m\ln\tau_i\right]=0$$

将 $\eta_i=e^{a+b\phi_i}$ 带入,解此三个方程,即可得参数 m,a 和 b 的极大似然估计.[11]

经过对原始实验数据的极大似然分析,我们发现在对环保型电子节能灯进行加速寿命实验时,实验时间与实际寿命有如下关系:由于节能灯功率小于15 W时通常称为小功率节能灯,大于15 W时称为大功率节能灯,在同一瓦数范围内,节能灯的内部构件特性基本相同,因此我们以15 W作为分界进行分析,得出结论如表2.

表 2　计算结果

Table 2　Calculation results

功率/W	温度/℃	试验时间/实际寿命	温度/℃	试验时间/实际寿命	温度/℃	试验时间/实际寿命
≤15	50	50	60	25	70	12.5
>15	60	50	70	25	80	12.5

3　结　论

随着现代科学技术的迅猛发展，人们需要在尽可能短的时间内获得产品的质量信息．“加速”寿命试验方法的研究和实践作为一种质量控制过程中的重要测试手段之一，曾引起国际电工委员会的高度重视，正成为国内外相关研究机构和产业界着力攻克的课题之一．我们针对环保型电子节能灯产品使用寿命快速检测方法急需解决的现状，以实验数据为基础，提出了一种改进的极大似然估计的方法，对基于威布尔分布的环保型电子节能灯寿命数据进行分析的初步方法．该方法利用加速寿命实验的手段，获取环保型电子节能灯使用寿命的数据，又利用威布尔分布模型和数理统计方法，实现了高应力下实验时间的等效折算；采用改进的极大似然估计，对环保型电子节能灯的寿命数据进行分析．

这种通过对产品进行加速寿命试验，将得到的试验数据换算到正常应力下的寿命数据，从而较快地得到了产品的寿命参数，实现环保型电子节能灯使用寿命的快速检测．在理论和实验的结合上为“加速”寿命试验和考核电子节能灯的主要质量指标提供了较为有效的测试分析数据和检测方法，并为新产品开发过程中环保型电子节能灯的寿命“预测和评估”提供了一种有效手段；也为电子节能灯的“加速”寿命试验建立相关标准，从而为进一步研究环保型电子节能灯使用寿命快速检测技术提供了有益的参考．

【参　考　文　献】

[1] 张钟华．现在计量测试技术的发展[J]．中国计量学院学报，2006，17(3)：1-3．

[2] 茆诗松，王玲玲．加速寿命试验[M]．北京：科学出版社，2000：75-78．

[3] 张建中，费鹤良，王玲玲．威布尔分布参数估计方法的精度比较[J]．应用数学学报，1982，5(4)：15-17．

[4] 刘智敏．统计 t 分布的新计算与应用[J]．中国计量学院学报，2004，15(3)：21-25．

[5] 马海训．关于加速寿命试验及其统计分析问题[J]．数理统计与应用概率，1989，4(3)：376-387．

[6] 许家清，王玲玲．指数分布下步加试验中的区间估计[J]．数理统计与应用概率，1997，12(2)：185-190．

[7] 程依明．步进应力加速寿命试验的最优设计[J]．应用概率统计，1994，10(1)：52-61．

[8] 茆诗松．指数分布场合下步进应力加速寿命试验的统计分析[J]．应用数学学报，1985，8(3)：311-316．

[9] LAWLESS J F. Statistical Models and Methods for Lifetime Date[J]. New york: John Wiley & Sons, 1982：108．

[10] NELSON W. Accelerated life testing-step-stress models and data analysis[J]. IEEE Trans Reliability, 1980, 29: 103-108．

[11] NELSON W. Accelerated testing: statistical models, test plans and date analysis[M]. New York: John Wiley & Sons, 1990：50-55．