

文章编号 1004-924X(2012)12-2661-06

基于模糊综合评判法评价发光二极管灯具的可靠性

李德胜¹, 邹琳¹, 张云翠¹, 邹念育^{1*}, 姜楠²

(1. 大连工业大学光子学研究所, 辽宁大连 116034; 2. 国家半导体照明工程研发及产业联盟, 北京 100000)

摘要: 基于数学模糊综合评判法建立了一种发光二极管(LED)灯具可靠性评价的模型。首先, 从 LED 光源、散热系统、使用环境 3 个方面对影响 LED 灯具可靠性的因素进行了分析, 建立了评价 LED 灯具寿命的因素集、评判集; 然后, 采用德尔菲调查法得到了各因素相应的权重系数; 最后, 通过选择合适的模糊算子建立了灯具可靠性评价模型。利用所建立的模型对一款 LED 路灯的可靠性进行了评价, 结果表明: 所建立的数学模型可以快速、有效地评价 LED 灯具系统的可靠性。利用所建立的模型, 不仅可以节省寿命试验成本, 还可为早期失效产品的筛选及产品质量管理提供依据。

关键词: 发光二极管灯具; 可靠性; 模糊算法; 评价模型

中图分类号: TN383.1; TN312.8 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122012.2661

Evaluation of reliability for LED lamp based on fuzzy algorithm

LI De-sheng¹, ZOU Lin¹, ZHANG Yun-cui¹, ZOU Nian-yu^{1*}, Jiang Nan²

(1. *Research Institute of Photonics, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, China;*

2. China Solid State Lighting Alliance, Beijing 100000, China)

** Corresponding author, E-mail: n_y_zou@dlpu.edu.cn*

Abstract: An evaluation method for the reliability of Light Emitting Diode(LED) lamps was established based on fuzzy comprehensive evaluation algorithm. Firstly, the major factors which affect the reliability of LED lamps were studied from three aspects on the LED light source, heat-removal system and working environments, and a factor set and an evaluating set for the LED lamp lifetime were built up at the same time. Then, the weighing coefficient of each factor was obtained based on Delphi evaluation method. Finally, the evaluation model for the reliability of LED lamps was built up by choosing appropriate fuzzy operators. The reliability of a LED streetlight lamp was evaluated using the evaluation model. The results show that the designed model can evaluate the reliability of LED lamps quickly and effectively. It not only can save the experiment cost, but also can provide the foundation for screening failure products and managing product quality.

Key words: Light Emitting Diode(LED) lamp; reliability; fuzzy algorithm; evaluation model

收稿日期: 2012-09-30; 修订日期: 2012-11-04.

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划资助项目(No. 2011BAE01B06); 辽宁省高校优秀人才计划资助项目(No. LR201006); 辽宁省教育厅科研项目(L2012184); 大连市科技计划资助项目(No. 2011A12GX014); 大连工业大学青年科学基金资助项目(No. QNJ201219)

1 引言

发光二极管(LED)因其固有的长寿、高效、节能、环保等优点,已经广泛应用于指示性照明、景观照明、舞台照明等各种领域^[1-2]。目前功率型白光 LED 的实验室数据已接近 200 lm/W,成熟的产品数据也已超过 100 lm/W,已经具备了应用于通用照明的条件,尤其是耗电量较大的道路照明对 LED 灯具的需求量更为突出。目前,大力发展以半导体为代表的新兴照明产业已成为世界各国的共识,而白光 LED 在业界被普遍认为是替代传统照明器具的最具优势的潜力商品,因此,LED 的研究在国内外相关领域倍受关注^[3-5]。

LED 作为一种新兴产品,必须有相应的标准对其相关参数进行检验。目前,LED 多数照明参数如色温、光效等都已经有了严格定义及标准的测试方法。然而,在实际应用中,人们更为关注的是 LED 灯具的可靠性问题。从实用观点出发,人们希望能利用尽可能短的实验时间对 LED 灯具在不同条件下的可靠性进行估计。但由于 LED 的寿命和技术的迅速提升,在其进入市场前,不可能花费 10~30 年的时间测量其使用寿命的可靠性。因此,如何在短时间内较为准确地预测白光 LED 灯具的使用寿命,已成为学术界和产业界共同关心的问题。国外研究人员正致力于建立一种能评价 LED 灯具系统可靠性的合理模型^[6-8]。

LED 光源的可靠性可以通过温度加速和电流加速寿命试验进行测试^[9-10],但 LED 灯具系统不同于 LED 光源,影响其可靠性的因素众多且复杂。LED 灯具系统的使用寿命不仅与材料、设计、工艺和应用等因素有关,还与光学系统、驱动电源、散热设计等不同功能的子系统有密切的关联。因此,要准确评价整体灯具的寿命,不仅需要科学评价各个子系统的可靠性,还要科学地确定各子系统之间的内在联系。但在实际运行中还有许多因素目前无法用确切的计算来考量,这就对 LED 灯具的寿命预测提出了挑战,而模糊数学中的综合模糊评判方法可能成为解决 LED 灯具寿命评价问题的方法之一。

模糊综合评判法是应用模糊关系合成的原

理,对受到多种因素制约的事物或对象做出总体的评价,即把定性评价转化为定量评价,这样就可以很好地解决评价难以量化的问题。目前,模糊综合评判法已广泛用于评价桥梁、铁路、军用机械等复杂系统的可靠性^[11-12]。

本文采用基于专家打分法和多层次分析法的综合评判法,建立了一种新型的 LED 灯具的可靠性评价模型,并利用所建立的模型对实验室一款 LED 路灯的可靠性进行了评价。

2 模糊综合评判模型的建立

根据影响评价对象因素的复杂性,模糊综合评判法可分为单层次模糊评判和多层次模糊评判。由于影响 LED 灯具寿命的因素众多,本文采取多层次模糊评判法对其寿命进行评价。

2.1 因素集确定

因素集的选择需要全面包含影响评价对象的因素。LED 灯具的寿命主要通过光源体现,当然,其它一些因素对其可靠性也有不可忽略的影响。LED 是受温度影响较为严重的器件,因此散热系统的优劣对其可靠性有重要的影响。同时,风沙、降水、气温等环境条件对 LED 路灯的可靠性也有一定影响。

通过比较研究,将影响 LED 灯具可靠性的因素分为两层,第一层因素分别为 LED 光源 $\{u_1\}$ 、散热系统 $\{u_2\}$ 、使用环境 $\{u_3\}$,即 $U = \{u_1, u_2, u_3\} = \{\text{LED 光源, 散热系统, 使用环境}\}$;其权重集为 $W = \{W_1, W_2, W_3\}$ 。

第二层因素设计为:LED 光源 $\{u_1\}$ 的因素集 $\{u_{11}, u_{12}, u_{13}\} = \{\text{衬底材料, 发光原理, 封装材料}\}$,相应的权重集为 $W_1 = \{W_{11}, W_{12}, W_{13}\}$;散热系统 $\{u_2\}$ 的因素集 $\{u_{21}, u_{22}\} = \{\text{散热材料, 散热方式}\}$,相应的权重集为 $W_2 = \{W_{21}, W_{22}\}$;使用环境 $\{u_3\}$ 的因素集 $\{u_{31}, u_{32}, u_{33}\} = \{\text{环境温度, 降水条件, 风沙环境}\}$,相应的权重集为 $W_3 = \{W_{31}, W_{32}, W_{33}\}$ 。另外,驱动电源对其可靠性也有十分重要的影响,鉴于目前市场上的驱动电源质量不尽相同,同时,驱动电源是一个相对独立的部分,可以

对其进行单独更换,因此本文对驱动电源不予以考虑。

2.2 评判集的确定

将 LED 灯具的损害严重度划分为 4 个等级,如表 1 所示。

表 1 LED 灯具损害严重度等级
Tab.1 Severity class of LED lamps

严重度等级	对灯具的影响
非常严重的损害	对灯具可靠性有严重的影响,使其寿命缩短理论值 50%以上
严重的损害	对灯具可靠性有较大影响,使其寿命缩短理论值的 30%
轻的损害	对灯具可靠性有较轻的影响,使其寿命缩短理论值的 10%
可忽略的损害	对灯具可靠性没有直接影响,灯具寿命可以达到理论值

根据表 1 得 LED 灯具寿命评价判集为: $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4\} = \{\text{非常严重的损害, 严重的损害, 轻的损害, 可以忽略的损害}\}$ 。该结果的定性结论可分别表示为差、中、良、优,即 $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4\} = \{\text{差, 中, 良, 优}\}$,具体评价数据如表 2 所示。

根据经验给出 LED 灯具寿命评价的评价集 $V = (0.3, 0.5, 0.7, 0.9)$ 。

表 2 LED 灯具可靠性评价集数据表
Tab.2 Evaluation set for LED lamps

定性结论	评价区间
差	$0.3 \leq C < 0.5$
中	$0.5 \leq C < 0.7$
良	$0.7 \leq C < 0.9$
优	$0.9 \leq C < 1$

2.3 构造评判矩阵

通过影响 LED 灯具寿命的不同因素,利用层次分析法建立评判矩阵。评判矩阵为:

$$D = \begin{pmatrix} u_{11} & u_{12} & \cdots & u_{1n} \\ u_{21} & u_{22} & \cdots & u_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{m1} & u_{m2} & \cdots & u_{mn} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

其中: u_{ij} 表示第 i 个因素对第 j 个因素的相对重要度,取值如表 3 所示。

表 3 LED 灯具重要度等级取值
Tab.3 Numbers of important degree for LED lamps

重要度等级	
重要度取值	说明
1	x 对灯具寿命的影响和 y 同等重要
5	x 对灯具寿命的影响比 y 明显重要
9	x 对灯具寿命的影响比 y 极其重要,具有压倒性的程度

2.4 选择评判函数进行计算

在模糊综合评判中,设 $W = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m) \in I^m$, 是归一化权向量,对于任意 $(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m) \in I^m$, 加权平均型评判函数为:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_m) = \sum_{i=1}^m \omega_i x_i, \quad (2)$$

其中, f 称为加权平均型综合评判函数, ω_i 可解释为第 i 个因素在综合评判中所占比重。

这里权向量采用层次分析法中的和法计算,即对于给定的评判矩阵 $D = (u_{ij})_{n \times n}$, 可令:

$$\omega_i = \frac{1}{n} \sum_{j=2}^n \frac{a_{ij}}{\sum_{k=1}^n a_{kj}}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

以 $W = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m)^T$ 作为权向量计算一阶模糊综合判断:

$$\begin{aligned} B_1 &= W_1 \times R_1 = (b_{11}, b_{12}, b_{13}, b_{14}) \\ B_2 &= W_2 \times R_2 = (b_{21}, b_{22}, b_{23}, b_{24}), \quad (4) \\ B_3 &= W_3 \times R_3 = (b_{31}, b_{32}, b_{33}, b_{34}) \end{aligned}$$

$$\text{得一阶综合判断矩阵为 } R = \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

计算二阶模糊综合判断为:

$$B = D \times R, \quad (6)$$

选择加权平均型评判函数,得出模糊评判结果为:

$$C = B \times VT. \quad (7)$$

3 LED 灯具可靠性评价实例分析

利用模糊算法评价系统可靠性时,各因素对应的权重及各因素的隶属度关系到最后评价结果

的准确度。针对影响 LED 可靠性的各因素,邀请 20 位业内权威专家,对每个因素的严重度进行评价,可保证评判结果的准确性。

基于专家打分结果,对实验室一款 LED 路灯进行了评价。其光源衬底材料为碳化硅,封装材料为环氧树脂,采用荧光粉转化的方式获得白光。灯具的散热系统设计良好,采用热管方式散热,并使用导热较好的纯铝制作散热器。该灯具在环境气候温和的大连地区使用,结果如表 4 所示。

表 4 二级因素损害严重度评价结果

Tab. 4 Severity class evaluation results of second factors

		非常严重的损害	严重的损害	轻的损害	可忽略的损害
LED 光源	衬底材料	1	1	11	7
	发光原理	1	3	4	12
	封装材料	0	11	7	2
散热系统	散热材料	1	5	12	2
	散热方式	0	0	3	17
使用环境	环境温度	1	0	14	5
	降水条件	0	5	13	2
	风沙环境	0	0	4	16

将上述评价结果做归一化处理,得出评判矩阵为:

$$\mathbf{R}_1 = \begin{pmatrix} 0.05 & 0.05 & 0.55 & 0.35 \\ 0.05 & 0.15 & 0.2 & 0.6 \\ 0 & 0.55 & 0.35 & 0.1 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{R}_2 = \begin{pmatrix} 0.05 & 0.25 & 0.6 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0.15 & 0.85 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{R}_3 = \begin{pmatrix} 0.05 & 0 & 0.7 & 0.25 \\ 0 & 0.25 & 0.65 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0.2 & 0.8 \end{pmatrix} \quad (8)$$

采用层次分析法,各级因素权重定义为:

$$\mathbf{W} = (3.25, 0.93, 0.58)$$

$$\mathbf{W}_1 = (1.98, 0.27, 0.76)$$

$$\mathbf{W}_2 = (0.33, 1.67)$$

$$\mathbf{W}_3 = (1.98, 0.76, 0.27)$$

将上述权重向量归一化为:

$$\mathbf{W} = (0.68, 0.20, 0.12)$$

$$\mathbf{W}_1 = (0.66, 0.09, 0.25)$$

$$\mathbf{W}_2 = (0.17, 0.83)$$

$$\mathbf{W}_3 = (0.66, 0.25, 0.09)$$

利用权重向量归一化结果计算一阶综合模糊判断为:

$$\mathbf{B}_1 = \mathbf{W}_1 \times \mathbf{R}_1 = (b_{11}, b_{12}, b_{13}, b_{14}) = (0.0375, 0.184, 0.4685, 0.31)$$

$$\mathbf{B}_2 = \mathbf{W}_2 \times \mathbf{R}_2 = (b_{21}, b_{22}, b_{23}, b_{24}) = (0.0085, 0.0425, 0.2265, 0.7225)$$

$$\mathbf{B}_3 = \mathbf{W}_3 \times \mathbf{R}_3 = (b_{31}, b_{32}, b_{33}, b_{34}) = (0.033, 0.0625, 0.6425, 0.262)$$

构造一阶综合判断矩阵为:

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} \mathbf{B}_1 \\ \mathbf{B}_2 \\ \mathbf{B}_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.0375 & 0.184 & 0.4685 & 0.31 \\ 0.0085 & 0.0425 & 0.2265 & 0.7225 \\ 0.033 & 0.0625 & 0.6425 & 0.262 \end{pmatrix} \quad (12)$$

计算二阶模糊综合判断为:

$$\mathbf{B} = \mathbf{A} \times \mathbf{R} = (0.03116, 0.14112, 0.44098, 0.38674)$$

选择加权平均型评判函数,得出模糊评判值为:

$$\mathbf{C} = \mathbf{B} \times \mathbf{V} = 0.73666 \quad (14)$$

根据 LED 灯具可靠性评价集数据表,该款灯具的可靠性水平属于良好水平。如果按照灯具理论寿命 1×10^5 h,则该款灯具的评价寿命为 73666 h。

4 结 论

本文从 LED 光源、散热系统、使用环境 3 个方面对影响 LED 灯具可靠性的因素进行了全面分析,并基于模糊综合评判法建立了一种 LED 灯具可靠性评价模型,用于 LED 灯具的可靠性评价

之中。利用所建立的模型,既可以节省寿命试验成本,又能为早期失效筛选及产品质量管理提供依据。需要指出的是,在实际评价一款灯具的可

靠性时,还需将灯具生产厂家的工艺水平考虑进来,如何将生产企业纳入到评价模型中来,是我们下一步要解决的问题。

参考文献:

- [1] TSAO J Y. Solid state lighting, lamps, chips and materials for tomorrow [J]. *IEEE Circuits & Device Magazine*, 2004, 20(3):18-37.
- [2] BERGH, CRAFT G, DUGGAL A, *et al.*. The promise and challenge of solid state lighting [J]. *Physics Today*, 2001, 54(13):42-47.
- [3] STEIGERWALD D A, BHAT J C, COLLINS D D, *et al.*. Illumination with solid state lighting technology [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2002, 8(2):310-320.
- [4] 金鹏,喻春雨,周奇峰,等. LED在道路照明中的光效优势[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(1): 51-55.
- JIN P, YU CH Y, ZHOU Q F, *et al.*. Superior application of LED to street lighting [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(1): 51-55. (in Chinese)
- [5] 屠大维,吴仍茂,杨恒亮,等. LED封装光学结构对光强分布的影响[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(5): 832-838.
- TU D W, WU R M, YANG H L, *et al.*. Effect of optical structure on output light intensity distribution in LED package [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(5): 832-838. (in Chinese)
- [6] VANDRIEL W D. Solid state lighting reliability: from components to system [C]. *Proceeding China SSL*, 2010, 202-206.
- [7] KOH S, VANDRIEL W D, YUAN C, *et al.*. Solid state lighting system reliability [C]. *Proceeding China SSL*, 2011, 121-126.
- [8] FARLEY D, VAN DRIEL W D, ZHANG G Q. Using physics of failure and modeling in SSL system reliability assessment [C]. *Proceeding China SSL*, 2011, 127-131.
- [9] SUHIR E. Accelerated life testing in photonics packaging: Its objectives, role, attributes, challenges, pitfalls, predictive models, and interaction with other accelerated stress categories [C]. *Laser diodes, optoelectronic devices, and heterogenous integration*, 2003, 175-196.
- [10] 高金环,彭浩,武红玉,等. 功率LED使用寿命评价[J]. *半导体技术*, 2009, 34(5): 452-457.
- GAO J H, PENG H, WU H Y, *et al.*. Evaluation of power LED operation life [J]. *Semiconductor technology*, 2009, 34(5): 452-457. (in Chinese)
- [11] 李曙林,杨森,孙冬. 军用飞机环境适应性评价模型[J]. *航空学报*, 2009, 30(6): 1053-1057.
- LI SH L, YANG S, SUN D. Evaluation model of environmental worthiness for military aircraft [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2009, 30(6): 1053-1057. (in Chinese)
- [12] 武月琴,傅耘,敖亮. 典型环境条件下装备环境适应性的评估方法[J]. *装备环境工程*, 2010, 7(6): 109-112.
- WU Y Q, FU Y, AO L. Equipment environmental worthiness evaluation method in representative environmental condition [J]. *Equipment environmental engineering*, 2010, 7(6): 109-112. (in Chinese)

作者简介:



李德胜(1980—),男,山东临沂人,博士,讲师,2009年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事半导体照明检测技术方面的研究。Email:desheng@dlpu.edu.cn



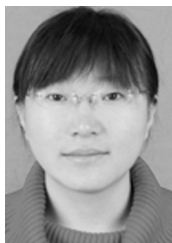
邹念育(1964—),女,辽宁锦州人,博士,教授,2003年于日本国立东北大学获得博士学位,主要从事光电子学领域光通信及新型照明方面的研究。Email:n_y_zou@dlpu.edu.cn



邹琳(1985—),女,辽宁大连人,研究生,主要从事 LED 可靠性影响因素及 LED 灯具寿命评价方面的研究。
Email:zoulin@dlpu.edu.cn



姜楠(1982—),男,北京人,硕士,主要从事半导体照明行业人力资源培训及相关技术培训工作。Email:jiangnan@bjmkq.com



张云翠(1979—),女,吉林省吉林市人,博士,2007 年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事灯具光学设计方面的研究。
Email:zhang_yc@dlpu.edu.cn

● 下期预告

纳米半导体复合薄膜的非线性光学性质及其在激光器中的应用

王加贤*,林正怀,张培,吴志军
(华侨大学 信息科学与工程学院,福建 厦门 361021)

采用射频磁控溅射技术制备 Ge 掺二氧化硅(Ge-SiO₂)和 Ge、Al 共掺二氧化硅(Ge/Al-SiO₂)两种复合薄膜,并进行热退火处理形成纳米 Ge 镶嵌结构。通过紫外-可见吸收谱测量,确定两种薄膜中纳米 Ge 的光学带隙。采用皮秒激光 Z-扫描技术研究薄膜的非线性光学性质,在 1 064 nm 激发下,得到 Ge-SiO₂和 Ge/Al-SiO₂薄膜的非线性吸收系数分别为 -1.23×10^{-7} 和 4.35×10^{-8} m/W,前者为饱和吸收,后者为双光子吸收。把两种薄膜作为可饱和吸收体均实现 1.06 μm 激光的被动调 Q 和被动锁模运转。实验结果表明,与 Ge-SiO₂薄膜比较,采用 Ge/Al-SiO₂薄膜可以获得较窄的调 Q 脉冲和锁模脉冲。理论上分析和比较了两种薄膜实现被动调 Q 和锁模的机理。