

光固化三维立体打印用液晶显示屏寿命测评试验研究

张世安^{1*}, 杨中波², 陈财有², 付先龙², 朱麾忠¹, 王成群¹

(1. 北京睿智航显示科技有限公司, 北京 100176; 2. 鄂尔多斯市源盛光电有限责任公司, 内蒙古鄂尔多斯 017020)

摘 要: 以典型光固化三维立体打印用液晶显示屏产品为研究对象, 通过客户端不良信息收集, 识别影响整机光固化功能组件液晶显示屏关键特性并确定其失效阈值。利用基于产品性能退化的寿命评价方法进行实验设计与实施, 通过分布检验、Weibull概率纸法、模型回归和拟合找到该产品的可靠度、累计失效概率、故障率, 为技术人员在可靠性预计与维保方面提供技术指导。

关键词: 光固化三维立体打印用液晶显示屏; 性能退化; 失效阈值; 分布检验

中图分类号: TN27 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-488X(2022)02-0089-06

Research on TFT-LCD Life Test for 3D Printing

ZHANG Shian¹, YANG Zhongbo², CHEN Caiyou², FU Xianlong², ZHU Huizhong¹, WANG Chengqun¹

(1. Beijing Smart-aero Display Technology Co., Ltd, Beijing 100176, CHN; 2. Ordos Yuansheng Optoelectronics Limited Corporation, Ordos Inner Mongolia, 017020, CHN)

Abstract: Typical light-curing 3D printing LCD products were taken as the research object. Through the collection of bad information from the clients, the key characteristics of LCD that could affect the light curing function of the whole machine were identified and the failure threshold was determined. The life evaluation method was used based on product performance degradation to carry out the experimental design and implementation. Through the distribution test, Weibull probability paper method, model regression and fitting, the reliability, cumulative failure probability, and failure rate of the product could be found, which was expected to provide technical guidance on maintenance.

Key words: LCD for 3D printing; performance degradation; failure threshold; distribution test

引 言

液晶显示模块属于高可靠、寿命较长的电子产

品。常规背光源波长为380 nm~700 nm可见光区域, 亮度约为5 000 cd/cm²~15 000 cd/cm²。液晶显示模块光电指标(如亮度、亮度一致性、对比度等)

收稿日期: 2021-11-17

作者简介: 张世安(1989—), 男, 主要从事液晶显示器件测试技术、质量改进方面的研究工作; (E-mail: Zhangshian@boe.com.cn)

杨中波(1994—), 男, 主要从事液晶显示器件可靠性方面的研究工作; (E-mail: Yangzhongbo@boe.com.cn)

付先龙(1984—), 男, 主要从事液晶显示器件测试技术、质量改进、可靠性方面的研究工作。 (E-mail: fuxianlong@boe.com.cn)

* 通讯作者

会随着背光源光电指标的变化而发生漂移。光固化三维立体打印基本原理是使用UV灯作为背光源,液晶显示屏通过接收指定的信号以调整对应区域液晶的开口率。UV光根据液晶开口率实现选择透过性功能,即 L_{255} 灰阶下通过, L_0 灰阶下截止,实现对上侧光敏树脂的整层固化,最终实现造物的功能。

1 研究过程

1.1 UV光对液晶显示屏影响

UV光对液晶面板的主要影响表现在液晶和偏光片。液晶是一种有机化合物,液晶化合物在可见光的吸收较小,但在紫外和红外的两个光谱区域吸收较强。前者是液晶面板受热导致,紫外光主要是影响显示面板的光稳定性及寿命,因为紫外光会打断长链液晶分子的化学键,导致液晶紊乱,从而影响选择透过性功能;而偏光片材料主要由PVA(聚乙烯醇)、TAC(三醋酸纤维素)、PSA(压敏胶)等多层高分子光学薄膜复合而成,其中UV光照主要会导致PVA膜中的非晶区发生重排,提升其结晶度,从而引起PVA膜中碘离子的结构发生变化,最终导致偏光片的透过率发生变化。从图1偏光片不同膜材紫外光吸收特性中可以发现,不同膜材在405 nm左右的紫外光下透过率都超过了60%,故偏光片对该波段下紫外光阻挡效果较小。紫外光谱区分为:UVA、UVB和UVC三种不同波长的紫外线。其中UVA称长波黑点效应紫外线,波长为320 nm~420 nm,UVB称中波红斑效应紫外线,波长为275 nm~320 nm,UVC称为短波灭菌紫外线,波长为200 nm~275 nm。

从图2紫外光吸收光谱中可以发现,玻璃和

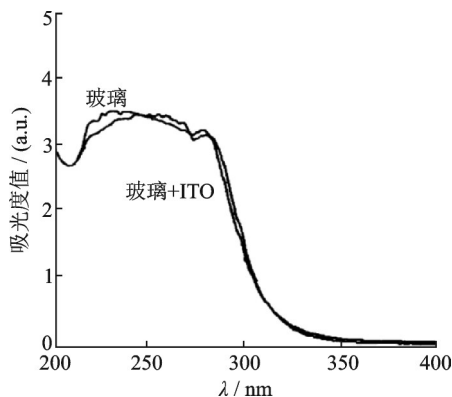


图1 不同材料紫外吸收特性^[1]

Fig.1 UV absorption characteristics of different materials^[1]

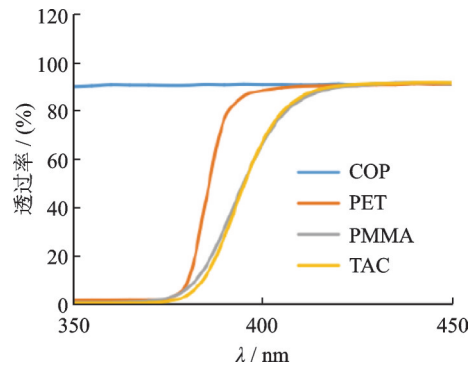


图2 紫外吸收光谱^[1]

Fig.2 UV absorption spectrum^[1]

ITO玻璃的紫外吸收光谱基本一致。两者在UVA区吸收很弱,在UVC区吸收较强。目前降低UV紫外光对偏光片和液晶影响的手段主要是在偏光片膜材中添加紫外吸收剂或选择添加有紫外吸收剂的PMMA。

1.2 光固化三维立体打印用液晶显示屏整机端不良信息收集

通过对光固化三维立体打印用液晶显示屏组件厂和整机厂沟通和收集不良信息,发现失去选择透过性的液晶面板在常规背光源下通常表现为画面异显如:表面污渍(如图3)、表面烙印(如图4)、屏幕发黄等。

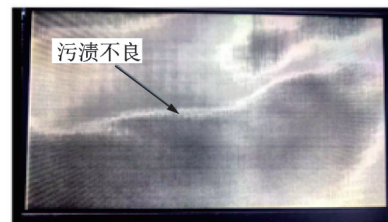


图3 表面污渍不良

Fig.3 Ripple defect on Panel

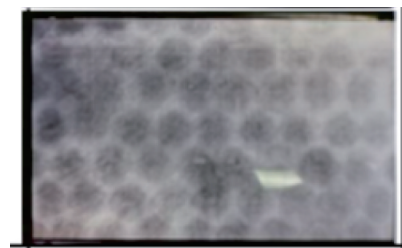


图4 表面烙印不良

Fig.4 Mark defect on Panel

面板表面污渍失效机理主要是液晶面板 TFT 特性发生变化,污渍位置的MOS管TFT特性发生退化

直至失效,其表现为无法输出GOA特性。表面烙印和屏幕发黄主要是液晶核内化学特性发生变化。

目前,常规光固化三维立体打印用液晶显示屏寿命评估方法是整机厂将三维立体打印机处于持续打印状态并通过主观目视检查打印效果来判断液晶显示屏寿命。液晶显示屏失效的特性指标以 L_0 辐射能量和对比度为主。通常情况下,液晶显示屏在紫外光照射下其光学指标 L_{255} 辐射能量、 L_0 辐射能量会随时间呈上升趋势。通常情况下,当 $L_0 \geq 30 \mu\text{w}/\text{cm}^2$ 就会引起光敏树脂固化,液晶显示屏失去选择透过性,打印失败。在这里需要说明, L_0 并不是影响光固化三维立体打印用液晶显示屏打印效果的唯一指标,其余光学指标: L_{255} 辐射能量, L_{255} 透过率, L_0 透过率和对比度 CR 都对打印效果有一定的影响。例如:光敏树脂的固化速度会直接影响光固化三维立体打印速度,而光敏树脂的固化速度又受 L_{255} 辐射能量的制约。如果既要液晶显示屏受UV光照影响程度降低到最小,又不能牺牲三维立体打印速度,则 L_{255} 需要满足高透过率。故三维立体打印机在具备选择透过性功能的前提下 L_{255} 透过率会影响光固化三维立体打印速度。基于以上信息,在接下来的实验设计和实施过程中仅将 $L_0 \geq 30 \mu\text{w}/\text{cm}^2$ 和 $CR \leq 270$ 作为失效阈值。前者会使液晶显示屏失去选择透过性功能,即 L_0 灰阶下液晶显示屏不能有效阻挡UV光从而导致光敏树脂发生固化影响打印质量;后者会严重影响三维立体打印速度使用户不能按预期完成打印任务。

1.3 光固化三维立体打印用液晶显示屏可靠性评价硬件系统

光固化三维立体打印整机结构通常由散热系统、软件控制系统、UV紫外光源、液晶显示屏、树脂槽、成型平台和三轴控制系统等组成(如图5所示)。对于液晶显示屏生产厂来说,直接用整机端三维立体打印机作为液晶显示屏可靠性评价硬件系统的方案,无论从试验数量、试验效率和试验项目等维度看显然是行不通的。而直接用UV光源进行持续照射又不能有效模拟光固化三维立体打印机中液晶显示屏的老化过程。故在进行文中实验设计与实施之前,搭建了光固化三维立体打印用液晶显示屏可靠性评价硬件系统。该硬件系统主要由405 nm阵列式紫光灯、遮光板、透明玻璃板、散热组件、定时装置等组成,如图6所示。

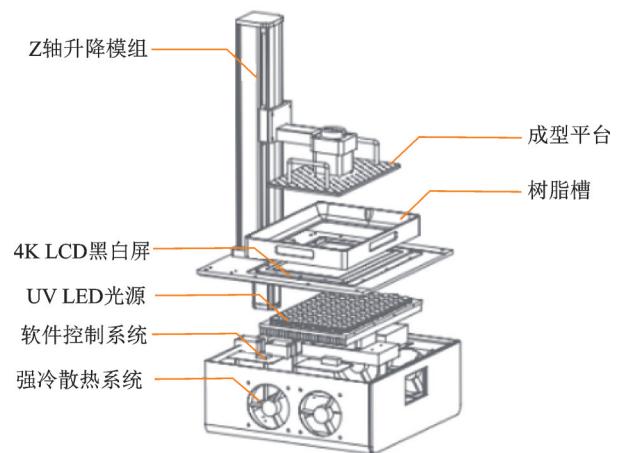


图5 光固化三维立体打印整机结构图

Fig.5 Schematic of 3D printing

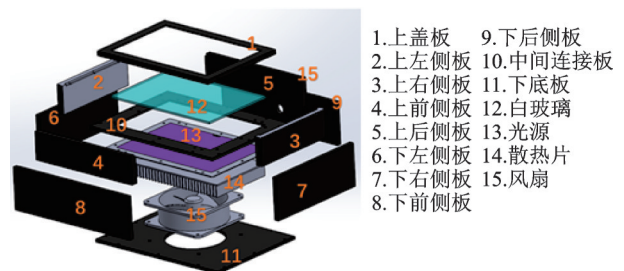


图6 光固化三维立体打印用液晶显示屏寿命评估装置结构图

Fig.6 Schematic of LCD aging device for 3D printing

1.4 实验

1.4.1 光固化三维立体打印用液晶显示屏寿命试验原理

光固化三维立体打印用液晶显示屏在打印过程中,由于受UV光的照射作用,总存在某种比较缓慢的物理化学变化。这一物理化学变化伴随着液晶显示屏某些光电特性的退化,当这些光电特性退化到一定的阶段即失效阈值,液晶显示屏会丧失选择透过性,即失效。

1.4.2 光固化三维立体打印用液晶显示屏寿命分布计算

液晶显示屏失效遵循一定的规律,常见的寿命分布有指数分布,对数分布,正态分布和Weibull分布等,不同的寿命分布其故障率、可靠度、累计失效率等可靠性参数差异较大。文中使用Minitab软件对产品寿命分布进行假设检验。

光固化三维立体打印用液晶显示屏寿命实验方案如表1所示。

表 1 光固化三维立体打印用液晶显示屏寿命试验方案表

Tab.1 Life test plan of liquid crystal display screen for light-curing 3D printing

实验方案	试验方案 1	试验方案 2	试验方案 2
应力水平	405 nm, 25±3 °C, 60%±5%RH, UV 光照能量 120 000 μw/cm ² , 光照间隔时间开 5 s 关 5 s	405 nm, 25±3 °C, 60%±5%RH, UV 光照能量 120 000 μw/cm ² , 持续照射	405 nm, 25±3 °C, 60%±5%RH, UV 光照能量 120 000 μw/cm ² , 光照间隔时间开 5 s 关 5 s
实验方法	恒定应力, 定时结尾 24 h	恒定应力, 定时结尾 24 h	恒定应力
失效判定	$L_0 > 30 \mu\text{w}/\text{cm}^2$ 或 $CR \leq 270$	$L_0 > 30 \mu\text{w}/\text{cm}^2$ 或 $CR \leq 270$	$CR \leq 270$ 停止试验并记录时间
样品数量	1 pcs	1 pcs	10 pcs
记录频次	1 次/6 h	1 次/6 h	30 h/次, 从 200 h 开始记录

1.4.3 实验过程

选用 10 台计量合格的直流稳压源、信号点灯机和光固化三维立体打印用液晶显示屏寿命评价工装, 根据三组实验方案分别进行试验。为了排除载物台在持续的 UV 光照射下产生热量, 对样本造成高温加速老化, 在老化装置的光源下侧装有散热系统, 保证 UV 光源及其上侧载物台蓄积的热量可以有效排出到系统外。在持续和间隔照射过程中, 通过使用热电偶对载物台中心点进行持续监测, 保证两种照射状态下的载物台温度不高于 50 °C。

实验过程中每隔一定时间对样品进行监控和测试, 确保实验数据的准确性, 并且及时记录, 对于出现的失效及时判定和分析, 确保属于实验正常失效。

1.4.4 结果与结论

1.4.4.1 单体间隔照射和持续照射

对该型号产品进行单体持续光照和间隔光照, 可以看出: L_{255} 辐射能量呈下降趋势, L_0 无明显趋势。通过对 L_{255} 辐射能量进行拟合可以看出, L_{255} 衰减趋势接近线性减少, 持续照射拟合效果相比间隔照射更佳(如图 7), 对比度随时间呈下降趋势, 持续光照相比间隔光照对比度衰减速度更快。虽然在 240 h 定时截尾下, 两个实验均未达到对比度的失效阈值, 但根据 L_{255} 衰减趋势来看, 连续光照下的对比度在接下来 20 h~40 h 会达到失效阈值。

1.4.4.2 持续光照相对于间隔照射加速因子分析

在图 8 中的间隔照射对比度 CR 中均匀取点:

$$(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3) \dots \quad (1)$$

$$X_i = y_{i+1} - y_i$$

$$(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3) \dots \quad (2)$$

$$Y_i = y_{i+1} - y_i$$

其中使时间间隔相同, X_i 和 Y_i 分别为间隔照射和持续照射试验过程中相同时间间隔所对应对比度变化值。

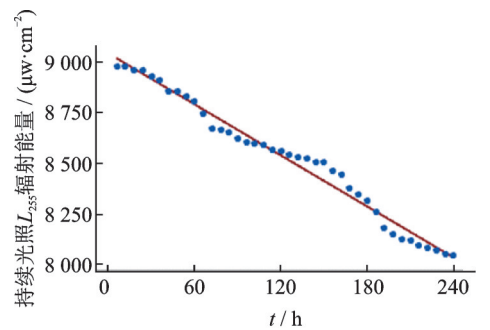
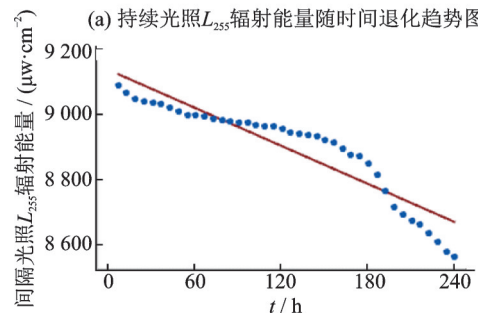
(a) 持续光照 L_{255} 辐射能量随时间退化趋势图(b) 间隔光照 L_{255} 辐射能量随时间退化趋势图图 7 间隔照射(a)和持续照射(b)下 L_{255} 退化趋势

Fig.7 Degradation trend for interval and continuous UV irradiation

以上公式中, x 为时间, y 为对比度, X_i 为间隔照射试验过程中对比度变化值, Y_i 为持续照射试验过程中对比度变化值, 在图 8 中均匀取点, 即 $x_n - x_{n-1} = x_n - x_{n-1}$, 将所有的点 (X_i, Y_i) 作散点图并进行线性拟合如图 9 所示。

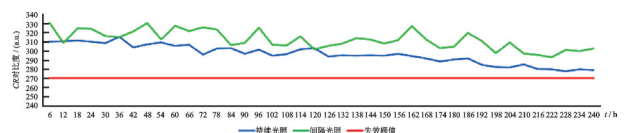


图 8 间隔照射和持续照射下对比度趋势

Fig.8 Trend of contrast for interval and continuous UV irradiation

从图 9 可以得出 $R^2=89.94\%$, $R^2(\text{调整})=89.67\%$, 因此可得出, 持续照射和间隔照射对比度降低与照射时间之间有较强的线性相关。

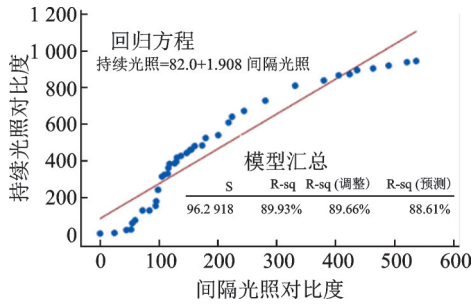


图9 持续光照相对间隔光照的线性回归模型

Fig.9 Linear regression model of continuous UV irradiation relative to interval UV irradiation

从图9还可以得到:持续光照相对于间隔光照的加速因子 $K=1.907$,说明持续光照是间隔光照在0 h~240 h,120 000 $\mu\text{w}/\text{cm}^2$ 405 nmUV光照下效果的约1.9倍。

1.4.4.3 寿命分布

通过使用Minitab对表2失效概率数据分别进行Weibull分布和指数分布验证和检验,可以得到Weibull分布下概率图(如图10)和指数分布下概率图(如图11)。通过图12各个分布拟合优度可以得出,产品的失效分布在Weibull分布下的拟合优度相对较好。

表 2. 失效概率数据

Tab.2 Data of failure probability

序号	失效时间范围/h	中位秩	阶段失效数	累积失效数	剩余数量	样品总量	瞬时失效率/(%)	可靠度R/(%)	累积失效率F/(%)	$x=\ln(t)$	$y=\ln(\ln(1/1-F(t)))$
1	200~230	215	0	1	9	10	0.00	90.0	10.0	5.370 638 028	-2.250 367 327
2	230~260	245	2	3	7	10	1.00	70.0	30.0	5.501 258 211	-1.030 930 433
3	260~290	275	0	3	7	10	0.00	70.0	30.0	5.616 771 098	-1.030 930 433
4	290~320	305	1	4	6	10	0.50	60.0	40.0	5.720 311 777	-0.671 726 992
5	320~350	335	1	5	5	10	0.50	50.0	50.0	5.814 130 532	-0.366 512 921
6	350~380	365	1	6	4	10	0.50	40.0	60.0	5.899 897 354	-0.087 421 572
7	380~410	395	2	8	2	10	1.00	20.0	80.0	5.978 885 765	0.475 884 995
8	410~440	425	1	9	1	10	0.005	10.0	90.0	6.052 089 169	0.834 032 445
9	>440	-	1	10	0	10	0.005	0.0	100.0	-	-

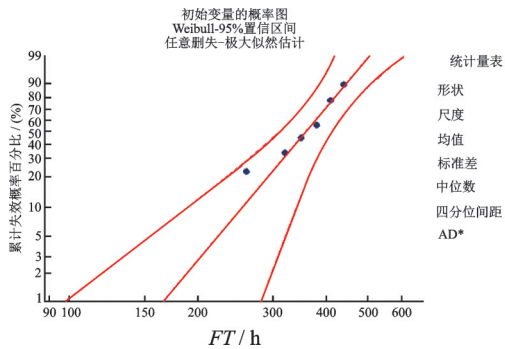


图10 Weibull分布下概率图

Fig.10 Probability graph under Weibull distribution

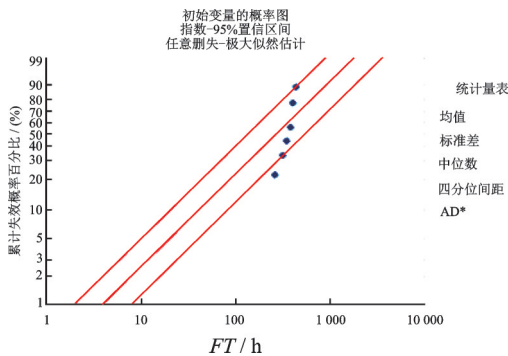


图11 指数分布下概率图

Fig.11 Probability graph under exponential distribution

拟合优度

分布	Anderson-Darling (调整)
Weibull	2.012
对数正态	2.073
指数	3.178
对数Logistic	2.027
3 参数 Weibull	2.110
3 参数对数正态	2.044
2 参数指数	2.426
3 参数对数 Logistic	2.021
最小极值	1.991
正态	2.037
Logistic	2.019

图12 各分布下的拟合优度

Fig.12 Goodness of fit under each distribution

1.4.4.4 寿命计算

根据 Weibull分布函数

$$F(t) = 1 - \exp[-(t/\eta)^m] \quad (t \geq 0) \quad (3)$$

将公式(3)变换为:

$$\ln\{-\ln[1-F(t)]\} = m \ln(t) - m \ln \eta \quad (4)$$

令 $y = \ln\{-\ln[1-F(t)]\}$, $x = \ln(t)$, $b = m \ln \eta$

故公式(4)变换为:

$$Y = mX + b \quad (5)$$

使用 Minitab 软件对 $\ln\{-\ln[1-F(t)]\}$ 和 $\ln(t)$ 进行线性回归和拟合,并从图13回归模型的拟合优度

和图 14 一元线性回归模型可以得出：

回归方程

$$Y = -23.35 + 3.976X$$

系数

项	系数	系数标准误差	T值	P值	方差膨胀因子
常量	-23.35	2.18	-10.70	0.000	
X	3.976	0.380	10.47	0.000	1.00

模型汇总

S	R-sq	R-sq(调整)	R-sq(预测)
0.238 506	94.81%	93.94%	88.70%

图 13 回归模型的拟合优度

Fig.13 Goodness of fit of regression model

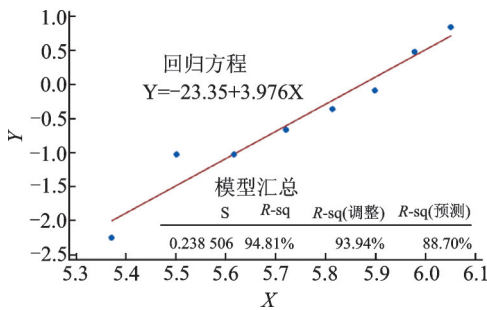


图 14 一元线性回归模型

Fig.14 Unary linear regression model

直线的斜率 $m=3.976$, 截距 $m \ln \eta = 23.35$

根据 m 值和截距可以计算出特征寿命：

$$\eta \approx 355 \text{ h}$$

根据在 Weibull 分布下的平均寿命公式：

$$\mu = \eta \Gamma(1 + 1/m) \quad (6)$$

其中 η 为特征寿命, m 为 Weibull 形状参数, $\Gamma(x)$ 伽马函数, 可以通过查询伽马函数表或通过 excel 函数求得。

根据公式(6), 可计算出中位寿命 $T(R=0.5) \approx 259 \text{ h}$ 。

上述结果说明, 该款产品在 $120\,000 \mu\text{w}/\text{cm}^2$ 、间隔照射条件下(开关各 5 秒, 失效阈值 $CR \leq 270$), 液晶显示屏特征寿命 η 约 355 h, 中位寿命 $t(R(t)=0.5)$ 约为 259 h。

通过以上研究分析, 得到该款产品在 $120\,000 \mu\text{w}/\text{cm}^2$ 、间隔照射条件下(开 5 秒关 5 秒, 失效阈值 ≤ 270), 得到累计失效概率, 可靠度和故障率, 如下所示：

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{355}\right)^{3.976}} \quad (7)$$

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{355}\right)^{3.976}} \quad (8)$$

$$\lambda(t) = \frac{3.976}{355} \left(\frac{t}{355}\right)^{2.976} \quad (9)$$

1.4.4.5 可靠性预测与保障

通过以上得到的累计失效概率模型可以进行可靠性预测与维保。以交付数量 2 000 pcs, 单片维保费用 500 元为例, 可以预测不同维保时间下累计产生的维保费用, 如图 15 所示, 为项目的边效情况提供技术指导。

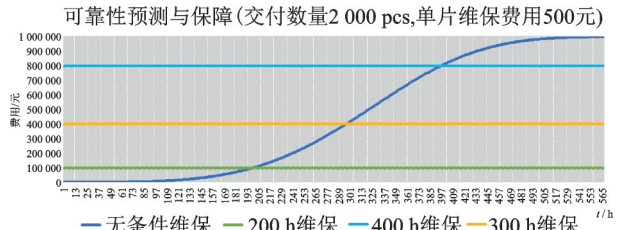


图 15 可靠性与维保预测

Fig.15 Reliability and maintenance prediction

有两点需要注意：

1. 目前, 行业内光固化三维立体打印用液晶显示屏终端客户通常给出的 $MTTF$ 为 1 000 h~2 000 h。部分整机厂是通过可靠性鉴定试验中的定时截尾试验方法推算出其产品的 $MTTF$ 区间估计的下限, $MTTF$ 为平均失效前时间, 其不能等同于电子产品的预期寿命。如果产品的失效寿命服从于指数分布, 其 $MTTF$ 约等于产品在可靠度 37% 左右下的寿命值, 即 $R(t) \approx 37\%$, 其中 $t=MTTF$ 。文中在 Weibull 概率纸进行描点, 通过一元回归线性方程的回归和拟合得到斜率和截距从而进一步得到 Weibull 方程的形状参数和位置参数, 得到了产品在指定条件下的可靠度、故障率、累计失效概率等, 但不能与整机厂给出的 $MTTF$ 等同对比。

2. 在整个试验过程中, 发现 L_0 辐射能量依然在保持在 $29 \mu\text{w}/\text{cm}^2$ 左右, 间隔光照和持续光照下辐射能力如图 16 所示。受项目研究周期的制约没有进一步监控 L_0 辐射能量, 如果以光固化三维立体打印用液晶显示屏失去选择透过性为失效阈值仅能得出, 该款产品的寿命大于 440 h。

本次研究得出的寿命分布、可靠度、累计失效概率等模型是基于以对比度为失效阈值的性能退化研究。

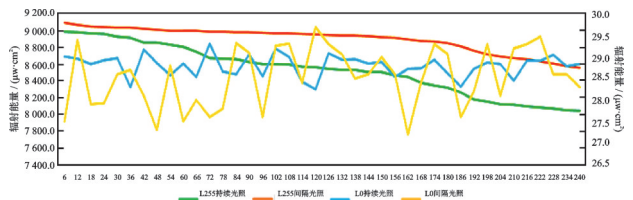


图 16 间隔照射和持续照射下辐射能量

Fig.16 L_0 & L_{255} for interval and continuous UV irradiation