

科技论坛

电子元器件的可靠性测试与评估技术分析

陈丹 刘君

(济南晶恒电子有限责任公司 山东省济南市 250014)

摘要:科技的迅猛进步促使电子产品广泛普及,电子元器件是电子产品的核心,在移动通信设备、个人计算机、交通工具及先进医疗设备等日常生活领域中扮演关键角色。电子元器件的广泛应用,使得电子元器件运行的稳定性和使用寿命成为公众关注的焦点,直接关系到电子产品性能的稳定发挥与长期使用效果。文章通过加速寿命测试、退化度量方法和威布尔分布及其概率纸等方法为电气元件的可靠性提供测试方法,并通过概率统计、物理可靠性和威布尔分布及其概率纸的结构和用法等技术对电子元器件的可靠性进行评估,望对电子元器件的设计、制造和应用提供参考意见。

关键词:电子元器件;可靠性测试;可靠性评估

引言:电子元器件作为电子设备的基础构件,可靠性水平直接决定整个电子系统运行的可靠性。随着技术迭代加速及应用场景的不断拓宽,对电子元器件的可靠性标准提出了更为严格的要求。对电子元器件进行有效的可靠性测试与评估流程,对于提升电子系统整体的稳定性和可靠性而言具有至关重要的意义。

一、电子元器件的可靠性测试技术方法

(一)加速寿命测试

电子元器件加速寿命测试技术内容涵盖了环境应力加速试验、退化加速试验和可靠性抽样试验等关键手段。环境应力加速试验作为核心方法,通过模拟高温、高湿、高压、高电场等极端条件下加速电子元器件的失效进程,缩短测试周期并精确评估电子元器件的可靠性,此方式能有效模拟电子元器件在不同工作环境中的性能表现确保评估的全面性与准确性。退化加速试验是通过人工调节高温或高电压等条件,加速电子元器件的老化过程,来预测电子元器件的长期性能变化及寿命^[1]。退化加速试验是通过对比电子元器件在加速老化前后的性能差异,评估实际使用寿命为产品设计与应用提供科学依据。可靠性抽样试验是运用统计学原理,通过选取代表性的样本再进行特定环境条件下的测试,根据样本失效情况推算整体可靠性水平。

(二)退化度量方法

退化度量方法基于电子元器件退化特征对电学参数、物理特性及化学特性进行直接监测与分析。电学参数监测通过漏电流、击穿电压等电性指标精确反映电子元器件的性能退化状;物理特性监测是对电子元器件尺寸、形态和重量的变化进行监测;而化学特性监测是对电子元气件的化学成分与材料组成的演变进行监测^[2]。以电容器为例,电学参数监测显示其电容值随时间递增而递减,具体表现为1000小时内下降率为2.5%/h,至2000小时增至4%/h。相关人员可以根据电学参数监测所得出

的数据推算出该型号电容器平均失效时间约为2550小时,在实际应用中需要严格控制使用条件,适时更换电容器增强系统可靠性。相关人员需要针对元器件特性及使用环境,合理选择退化度量方法并采取有效措施。

(三)威布尔分布及其概率纸的结构

威布尔分布作为可靠性分析中的核心与复杂分布之一,源自瑞典科学家威布尔基于材料强度统计理论的深入探索。在处理威布尔分布的参数估计时,相关人员直接从实验数据中解析求解形状参数 m 、尺度参数 t_0 及位置参数(通常设为0,简化分析)往往较为复杂。为此,图解法提供了一种更为简便直观的方法,核心在于利用威布尔概率纸这一特殊工具来辅助相关人员分析电子元器件失效数据并确定分布参数。

威布尔概率纸的建立基础是将威布尔分布的累积失效概率函数 $F(t) = 1 - e^{-(t/t_0)^m}$ 进行数学变换,使其转化为线性关系以便于图形化分析。具体是通过 $F(t)$ 的表达式进行变换,先取 $1 - F(t)$ 的倒数的自然对数,再对此结果取自然对数得到 $\ln(\ln(1/(1 - F(t))))$,记为 y ,同时 x 为 t 的自然对数 $\ln(t)$, B 为 t_0 的自然对数 $\ln(t_0)$ 。这样原函数关系就转化为线性方程 $y = mx - B$,其中 m 为直线斜率,代表形状参数, $-B$ 为 y 轴截距,与尺度参数 t_0 相关联。

威布尔概率纸设计上包含两个坐标系:一个是标准的 $x-y$ 直角坐标系,坐标轴遵循线性刻度,用于绘制转换后的数据点并拟合直线;另一个是特殊的 $t-F(t)$ 坐标系,是根据威布尔分布的特性非线性划分, t 轴刻度按 e^x 递增, $F(t)$ 轴则根据 $1 - e^{-(e^x)^m}$ 计算得到,两坐标系之间通过严格的数学关系相互映射,两坐标系对应轴上的特殊点之间的数值关系如表1所示。这种设计使得在 $t-F(t)$ 坐标系中难以直接识别的非线性关系,在 $x-y$ 坐标系中能够清晰地以直线形式展现,从而简化了失效数据的分析过程。通过测量拟合直线的斜率和截距,可方便地估算出威布尔分布的参数 m 和 t_0 。

表1 $x \sim t$ 和 $y \sim F(t)$ 数值的对应关系表

$X = \ln(t)$	0	1	2	3	4	5	6	7
$T = e^x$	1	2.72	7.39	20.01	54.60	148.41	403.43	1096.60

y	2	1	0	-0.367	-1	-2	-3	-4	-5
F (t)	0.999	0.935	0.633	0.5	0.308	0.127	0.486	0.019	0.007

二、电子元器件的可靠性评估技术

(一) 概率统计的可靠性评估方法

概率统计的可靠性评估手段对于精确量化元器件可靠性表现的优势。具体到某款电容器，其实验数据显示电容器的失效率与使用时长正相关，即在最初的 1000 小时内，每小时失效率为 0.6%/h，而扩展至 2000 小时观察期时，每小时失效率增长至 1.0%/h，根据概率统计得出的这些数据可计算出该电容器模型的平均失效时间约为 $\ln (1/0.7) /1000 \approx 1.4 \times 10^4 \text{h}$ ，根据计算可以直接得出电容器随时间增长而失效的可能性增高的趋势^[3]。相关人员在选择元器件时需要充分考虑可靠性指标及实际工作环境，以确保所选元器件能满足系统稳定性要求，还需要针对元器件的具体特性及应用条件，选取恰当的可靠性评估策略。

(二) 物理可靠性的可靠性评估方法

基于物理可靠性的评估方法集中于元器件的物理失效机理，物理可靠性评估方法通过对元器件固有的物理属性及其在特定应用环境下的表现进行详尽分析和实验验证，来量化评估其可靠性，整个评估过程涵盖了热应力测试以评估耐高温性能，机械性能测试以了解承受外部力的极限，以及电气测试来检查其在电流、电压等条件下的稳定性等多种物理测试手段。具体到实例，物理可靠性评估方法针对特定电子元件，通过模拟电子元件可能遭遇的机械应力并直至失效，测得其在 1300N 力下才会失效，而实际工况下所受最大力仅为 700N，因此确认电子元件在正常条件下运行高度可靠^[4]。类似的对半导体元件实施热失效测试，确定电子元件在 160℃ 以下能正常工作，远超实际工作中的 100℃ 最高温度，可以判定电子元件具有良好的热稳定性。相关人员在实际操作中，需要根据电子元件特性与应用环境特性，灵活选择并应用合适的物理测试方法。

(三) 威布尔分布及其概率纸的结构和用法

在可靠性试验的数据整理过程中，首先需将实际观测到的失效时间点（记为 t ）与对应的累积失效概率（表示为 $F(t)$ ）系统地记录下来，以此构建出一个数据表格，如表 2 所示。

表 2 按时间顺序制造的数据表

t	t1	t2	
F(t)	F(t ₁)	F(t ₂)	

在缺乏自动失效记录设备的实际试验环境中，通常采用定时检测的方式来记录产品失效情况。当在特定时间点 t_i 检测到有 K_i 个产品失效时，表示在紧接的前一时间段 $(t_i - t_{i-1})$ 内共有 K_i 个产品发生了失效，但具体到每个产品的失效时刻则无法精确获知。为解决此问题，业界常采

用等间隔分配策略，假定在 $(t_i - t_{i-1})$ 时间段内失效事件均匀分布，将该时间段划分为 $K_i + 1$ 个等长子区间，并假定每个子区间的结束时刻为对应产品的失效时间。相关人员为了从这些数据中推导出累积失效概率随时间变化的规律，需要绘制一条分布直线，把这条直线称为回归直线。在理想情况下所有的失效时间点均已知且精确，数据点会严格遵循一条直线分布。然而，由于试验中的抽样变异性性和测量误差，相关人员实际观测到的数据点往往会围绕理论上的回归直线而上下波动。为了确定这条回归直线相关人员可以采用最小二乘法或目视法。首先，所谓的最小二乘法是一种数学优化技术，找到一条直线使得所有数据点到该直线的垂直距离（即残差）的平方和达到最小，这样的直线称为最佳直线。其次，目视法虽然操作简便，但由于目视法主观性强且误差不易控制，因此通常目视法仅用于初步评估或精度要求不高的场合。相关人员在配置回归直线时，应严格遵循以下原则以确保其准确性和代表性：首先，直线应确保数据点在其两侧均匀交错分布，避免系统的偏差；其次，直线两侧的数据点数量应大致平衡，避免显著的不对称性；最后，特别关注累积失效概率 $F(t)$ 在 0.5 至 0.6 范围内的数据点，确保点与直线的偏差最小化，以更准确地反映失效过程的中心趋势。

结语：面对市场需求的动态变化和技术挑战的持续提升，相关人员需要持续深化对电子元器件的可靠性测试与评估技术的理解与运用，并勇于探索创新测试策略与评估模式，不仅是为了满足当前市场对产品可靠性的高标准要求，更是为了前瞻性地布局未来，确保电子产品在复杂多变的环境中仍能保持稳定、高效运行，为用户提供更加坚实可靠的科技保障。

参考文献:

[1]赵臣龙. 电子元器件可靠性测试与评估分析 [J]. 集成电路应用, 2024, 41 (06): 50-51.

[2]申德玮,刘涛,刘小建. 电子元器件的可靠性测试与评估技术分析 [J]. 集成电路应用, 2023, 40 (12): 383-385.

[3]张大为. 电子元器件的老化测试及最新设备浅述 [J]. 科学技术创新, 2019, (17): 151-153.

[4]戴俊夫,严明. 电子元器件失效分析及方法 [J]. 微处理机, 2015, 36 (04): 1-3+7.

陈丹, 女 (1983.02.26), 汉, 山东省枣庄市, 学历 大学本科 370402198302265421

刘君, 男 (1983.10.18), 汉, 山东省枣庄市, 学历 大学本科 370403198310180256