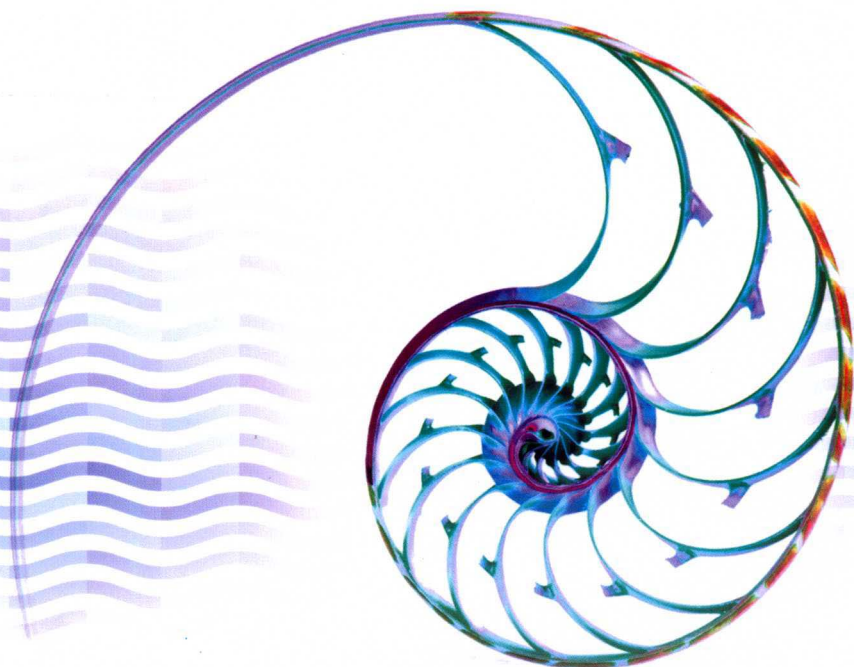


可靠性技术丛书

工业和信息化部电子第五研究所 组编



电子元器件检验技术 (试验部分)

◎ 王晓晗 罗宏伟 编著



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

电子元器件检验技术 (试验部分)

工业和信息化部电子第五研究所 组编
王晓晗 罗宏伟 编著

電子工業出版社·

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书的编写团队结合最新的科研成果及多年来在电子元器件检验技术方面的实战经验,以及我国电子元器件产业现状,从物理试验和可靠性试验等角度出发,详细描述了不同试验的概念、作用、涉及标准等,同时对团队多年来实际工作中的工程应用经验进行了概括总结。

本书不仅可以作为电子产品生产企业质量与可靠性工程师的参考指南,还可以作为电子元器件检验过程中试验技术的教科书,供高校师生阅读,具有极高的操作性和实用性。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

电子元器件检验技术. 试验部分/工业和信息化部电子第五研究所组编;王晓晗,罗宏伟编著. —北京:电子工业出版社,2019.2

(可靠性技术丛书)

ISBN 978-7-121-33484-9

I. ①电… II. ①工… ②王… ③罗… III. ①电子元器件—测试技术 IV. ①TN606

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第006823号

策划编辑:牛平月

责任编辑:赵娜

印刷:涿州市京南印刷厂

装订:涿州市京南印刷厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开本:787×1092 1/16 印张:24 字数:614.4千字

版次:2019年2月第1版

印次:2019年2月第1次印刷

定价:98.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888,88258888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式:(010)88254454, niupy@phei.com.cn。

前言

<<<<< PREFACE

电子元器件是构成电子设备的最基本单元,其优劣决定了整体设备的质量和可靠性。随着电子设备向精密化、智能化、小型化发展,任何一个电子元器件的质量问题都可能影响设备的整体运行。因此电子元器件检验作为电子元器件产品质量控制手段具有非常重要的作用。

电子元器件试验是考核电子元器件产品在不同环境条件下的环境适应性和寿命以及在不同的物理试验条件下的元器件物理性能,并评价其是否符合标准规定要求的过程。

本书是电子元器件检验技术(测试部分)的姊妹篇,编写团队长期从事电子元器件的试验工作,在多年环境试验、物理试验和可靠性分析实际工作经验的基础上,从电子元器件检验角度出发,详细描述不同试验的概念、作用、涉及标准和工程经验等。本书不仅可以作为电子产品生产企业质量与可靠性工程师的参考指南,还可以作为电子元器件检验过程中试验技术的教科书,供高校师生阅读,具有极高的操作性和实用性。

本书共分为 5 章,涵盖了寿命试验技术、环境试验技术、空间环境试验技术、物理试验技术、DPA 技术及结构分析技术等内容。其中寿命试验技术部分介绍了电子元器件寿命试验的概念及作用、应力对寿命的影响、加速寿命试验以及具体的试验标准、方法和工程经验等;环境试验技术部分介绍了电子元器件环境试验的概念、作用以及气候、机械环境、水浸、霉菌、盐雾、砂尘、综合环境试验的试验标准、方法;空间环境试验技术部分介绍了电离总剂量辐射效应、单粒子效应两种试验的标准、方法;物理试验技术部分介绍了电子元器件外观检查、密封等多类试验的原理、标准和方法等;DPA 技术及结构分析技术部分介绍了结构分析的一般方法以及结构分析与 DPA、失效分析的关系等内容。

本书共 5 章,各章执笔分别是:第 1、2、3 章,邓锐、邓传锦、王晓晗、费武雄、吕宏峰、龚维熙、陈波、姜思博;第 4、5 章,牛付林、周帅、王晓晗、卢思佳、刘磊、王斌。王晓晗、罗宏伟负责全书的组织、策划、汇总和校审工作。此外,吕宏峰参与了本书的统稿工作。书籍的编写过程中得到了电子元器件检验技术领域有关同事的大力协助,他们不仅给予了大量的文献资料而且提供了宝贵的经验总结。同时本书的写作还得到了各级领导、专家的大力支持,在此表示感谢。本书在编写过程中参考了国内外有关文献资料,在此对文献的作者表示感谢。

随着元器件技术的发展,测试技术和试验技术也不断深化和发展。由于编著者水平有限,书中难免存在不足之处,恳请广大同行、读者批评指正。

目录

<<<<< CONTENTS

第 1 章 寿命试验技术	(1)
1.1 概述	(1)
1.1.1 存储寿命试验	(1)
1.1.2 工作寿命试验	(2)
1.1.3 加速寿命试验	(2)
1.2 寿命分布	(3)
1.2.1 指数分布及其特点	(3)
1.2.2 正态分布及其特点	(4)
1.2.3 威布尔分布	(4)
1.3 寿命试验方案设计	(5)
1.4 加速寿命试验	(7)
1.4.1 加速寿命试验的目的	(7)
1.4.2 加速寿命试验的三个基本前提	(8)
1.4.3 加速寿命试验类型	(8)
1.4.4 加速应力和加速系数	(9)
1.4.5 加速模型	(9)
1.4.6 恒定应力加速寿命试验设计及实施	(15)
1.5 加速寿命试验数据处理	(17)
1.5.1 恒定应力加速寿命试验结果的图估计法	(18)
1.5.2 加速寿命试验的最好线性无偏估计法	(27)
1.6 对寿命试验的标准理解	(32)
1.7 寿命试验方法及技术	(34)
1.7.1 高温存储试验	(34)
1.7.2 铝电解电容器耐久性试验	(35)
1.7.3 集成电路稳态工作寿命试验	(36)
1.8 寿命试验中的一些技术问题	(37)
1.9 加速寿命试验案例——一种关键器件的加速寿命试验研究	(39)
1.10 加速寿命试验局限性	(42)
1.11 寿命试验技术发展趋势	(43)
本章参考文献	(44)

第2章 环境试验技术	(46)
2.1 概述	(46)
2.2 气候环境试验	(48)
2.2.1 低温试验	(48)
2.2.2 高温试验	(50)
2.2.3 温度变化试验	(53)
2.2.4 湿热试验	(57)
2.2.5 强加速稳态湿热试验	(61)
2.2.6 气候环境试验技术发展趋势	(62)
2.3 机械环境试验	(63)
2.3.1 振动试验	(63)
2.3.2 机械冲击	(80)
2.3.3 碰撞试验	(94)
2.3.4 恒定加速度	(98)
2.3.5 机械环境试验技术的发展趋势	(107)
2.4 水浸渍试验	(107)
2.4.1 水浸渍试验概述	(107)
2.4.2 水浸渍试验标准	(107)
2.4.3 水浸渍试验方法	(108)
2.4.4 水浸渍试验技术的发展趋势	(109)
2.5 霉菌试验	(109)
2.5.1 概述	(109)
2.5.2 霉菌试验的标准	(110)
2.5.3 霉菌试验的方法及技术	(111)
2.5.4 霉菌试验技术的发展趋势	(120)
2.6 盐雾试验	(120)
2.6.1 概述	(120)
2.6.2 盐雾试验的种类	(120)
2.6.3 盐雾对金属的腐蚀效应	(121)
2.6.4 盐雾试验标准	(122)
2.6.5 盐雾试验方法及技术	(123)
2.6.6 盐雾试验技术的发展趋势	(125)
2.7 砂尘试验	(126)
2.7.1 概述	(126)
2.7.2 砂尘试验标准	(127)
2.7.3 砂尘试验方法及技术	(128)
2.7.4 砂尘试验案例	(136)
2.7.5 砂尘试验技术的发展趋势	(140)
2.8 综合环境试验	(140)

2.8.1	概述	(140)
2.8.2	综合环境试验标准	(141)
2.8.3	综合环境试验方法及技术	(141)
2.8.4	综合环境试验技术发展趋势	(147)
本章参考文献		(147)
第3章 空间环境试验技术		(149)
3.1	热真空试验	(149)
3.1.1	概述	(149)
3.1.2	热真空试验标准	(149)
3.1.3	热真空试验方法与技术	(150)
3.2	空间环境辐射试验	(158)
3.2.1	概述	(158)
3.2.2	宇航用半导体器件电离总剂量试验标准	(163)
3.2.3	宇航用半导体器件电离总剂量试验方法	(167)
3.2.4	宇航用半导体器件电离总剂量试验案例	(172)
3.3	单粒子效应试验技术	(175)
3.3.1	概述	(175)
3.3.2	单粒子效应试验标准	(177)
3.3.3	单粒子效应试验方法	(179)
3.3.4	单粒子效应试验案例	(183)
3.4	空间环境试验技术的发展趋势	(188)
本章参考文献		(188)
第4章 物理试验技术		(191)
4.1	概述	(191)
4.2	外观检查	(191)
4.2.1	概念	(191)
4.2.2	试验标准	(192)
4.2.3	试验技术的发展趋势	(194)
4.3	密封试验	(195)
4.3.1	概述	(195)
4.3.2	试验标准	(195)
4.3.3	试验方法与技术	(196)
4.3.4	密封试验存在问题分析	(202)
4.3.5	密封检测技术的发展趋势	(202)
4.4	可焊性试验	(204)
4.4.1	概述	(204)
4.4.2	试验标准	(204)
4.4.3	试验内容	(205)
4.4.4	可焊性试验技术的发展趋势	(207)

4.5	X 射线照相	(208)
4.5.1	概述	(208)
4.5.2	试验标准	(208)
4.5.3	试验仪器	(208)
4.5.4	试验程序	(209)
4.5.5	试验判据	(209)
4.5.6	对标准的理解	(218)
4.5.7	X 射线照相技术的发展趋势	(218)
4.6	耐焊接热试验	(218)
4.6.1	概述	(218)
4.6.2	试验内容	(219)
4.6.3	耐焊接热试验技术的发展趋势	(223)
4.7	耐溶剂试验	(223)
4.7.1	概述	(223)
4.7.2	试验标准	(223)
4.7.3	试验方法	(224)
4.7.4	对标准的理解	(225)
4.7.5	耐溶剂试验技术的发展趋势	(225)
4.8	粒子碰撞噪声	(225)
4.8.1	概述	(225)
4.8.2	试验标准	(226)
4.8.3	对标准的理解	(228)
4.8.4	PIND 试验技术的发展趋势	(229)
4.9	引出端强度	(229)
4.9.1	概述	(229)
4.9.2	试验标准	(230)
4.10	声学扫描显微镜检查	(234)
4.10.1	概述	(234)
4.10.2	试验标准	(235)
4.10.3	试验过程中遇到的问题及解决思路	(238)
4.10.4	声学扫描显微镜检查技术的发展趋势	(239)
4.11	啮合力和分离力	(239)
4.11.1	概述	(239)
4.11.2	试验标准	(240)
4.11.3	试验程序	(240)
4.11.4	对标准的理解	(244)
4.12	啮合力矩和分离力矩	(244)
4.12.1	概述	(244)
4.12.2	试验仪器	(245)

4.12.3	试验程序	(245)
4.12.4	对标准的理解	(245)
4.13	镀层厚度	(246)
4.13.1	概述	(246)
4.13.2	工作原理	(246)
4.13.3	试验仪器	(247)
4.13.4	仪器校准	(248)
4.13.5	试验程序	(248)
4.13.6	X 射线荧光测厚仪测量条件选择及方法	(250)
4.13.7	镀层厚度测量技术的发展趋势	(251)
4.14	外形尺寸	(251)
4.14.1	概述	(251)
4.14.2	试验原理	(252)
4.14.3	试验内容	(252)
4.14.4	失效分析	(254)
4.14.5	外形尺寸测量技术的发展趋势	(254)
4.15	内部气体成分分析	(255)
4.15.1	概述	(255)
4.15.2	试验标准	(255)
4.15.3	试验方法与技术	(256)
4.15.4	数据分析	(260)
4.15.5	内部气体成分分析技术的发展趋势	(260)
4.16	开封	(261)
4.16.1	概述	(261)
4.16.2	试验标准	(261)
4.16.3	对标准的理解	(285)
4.16.4	开封技术的发展趋势	(285)
4.17	内部目检	(285)
4.17.1	概述	(285)
4.17.2	试验标准	(286)
4.17.3	内部目检技术的发展趋势	(287)
4.18	制样镜检	(287)
4.18.1	概述	(287)
4.18.2	试验方法与技术	(288)
4.18.3	制样镜检适用性的拓展	(292)
4.19	内引线键合强度	(293)
4.19.1	概述	(293)
4.19.2	试验方法与技术	(293)
4.19.3	内引线键合强度试验技术的发展趋势	(298)

4.20	芯片剪切强度	(298)
4.20.1	概述	(298)
4.20.2	试验方法与技术	(298)
4.20.3	芯片剪切强度失效分析	(301)
4.20.4	芯片剪切强度试验发展趋势	(301)
4.21	扫描电子显微镜检查	(301)
4.21.1	概述	(301)
4.21.2	试验标准	(304)
4.21.3	试验仪器	(304)
4.21.4	试验程序	(305)
4.21.5	接收/拒收判据	(310)
4.21.6	SEM 技术的发展趋势	(316)
4.22	倒装焊拉脱强度	(316)
4.22.1	试验的定义与理解	(316)
4.22.2	试验方法的内容	(316)
4.22.3	对标准的理解	(318)
4.23	染色渗透试验	(318)
4.23.1	概述	(318)
4.23.2	试验方法与技术	(319)
4.24	玻璃钝化层完整性检查	(321)
4.24.1	概述	(321)
4.24.2	试验标准	(321)
4.24.3	试验仪器	(321)
4.24.4	试验程序	(322)
4.24.5	试验判据	(322)
4.24.6	玻璃钝化层完整性检查技术的发展趋势	(324)
4.25	静电放电敏感度测试	(324)
4.25.1	概述	(324)
4.25.2	试验方法与技术	(324)
4.25.3	静电放电测试方法发展趋势	(328)
4.26	拉脱强度	(328)
4.26.1	概述	(328)
4.26.2	试验仪器	(329)
4.26.3	试验程序	(329)
4.26.4	试验判据	(330)
4.26.5	对标准的理解	(330)
4.27	断裂强度与断裂伸长率	(330)
4.27.1	概述	(330)
4.27.2	试验程序	(331)

4.27.3 对标准的理解 (333)

4.28 液体浸渍 (333)

4.28.1 概述 (333)

4.28.2 试验内容 (334)

4.28.3 试验液体的性状、用途及选择 (335)

本章参考文献 (336)

第 5 章 DPA 技术及结构分析技术 (340)

5.1 DPA 技术 (340)

5.1.1 概述 (340)

5.1.2 DPA 的目的和应用方向 (341)

5.1.3 主要元器件标准中要求的 DPA 试验 (341)

5.1.4 DPA 方法和程序 (342)

5.1.5 DPA 主要试验项目的作用 (348)

5.1.6 DPA 技术与其他质量分析的关系 (349)

5.1.7 案例 (350)

5.1.8 DPA 技术的发展趋势 (359)

5.2 结构分析技术 (360)

5.2.1 概述 (360)

5.2.2 结构分析的作用 (360)

5.2.3 试验标准、规范制定情况 (361)

5.2.4 结构分析与 DPA、失效分析的关系 (361)

5.2.5 结构分析的一般方法 (363)

5.2.6 结构分析案例 (365)

5.2.7 结语 (368)

本章参考文献 (368)

第1章

寿命试验技术

1.1 概述

寿命试验是研究产品寿命特征的方法，这种方法可在实验室模拟各种使用条件来进行。寿命试验也是可靠性试验中最重要最基本的项目之一，它是将产品放在特定的试验条件下考察其失效（损坏）随时间变化的规律。通过寿命试验，借助寿命-应力关系模型，可以了解产品的寿命特征、失效规律、失效率、平均寿命以及在寿命试验过程中可能出现的各种失效模式。结合失效分析，可进一步弄清导致产品失效的主要失效机理，作为可靠性设计、可靠性预测、改进新产品质量和确定合理的筛选、例行（批量保证）试验条件等的依据。如果为了缩短试验时间，可在不改变失效机理的条件下用加大应力的方法进行试验，即加速寿命试验。寿命试验可以对产品的可靠性水平进行评价，并通过质量反馈来提高产品的可靠性水平。

为评价产品寿命特征的试验，叫作寿命试验。寿命试验是在生产过程比较稳定的条件下，剔除了早期失效产品后进行的试验，通过寿命试验可以了解产品寿命分布的统计规律。寿命试验可以划分为多种：按任务条件可分为存储寿命试验、工作寿命试验；按施加应力可分为长期寿命试验、加速寿命试验；按数据处理方式可分为定时截尾试验、定数截尾试验。

1.1.1 存储寿命试验

在规定的环境条件下进行非工作状态的存放试验，称为存储寿命试验。

存储寿命试验条件通常为室内、棚下、露天等，因此存储的环境试验方法又称天然暴露试验。对于不可修产品，存储寿命是指在规定的条件下存储时，从开始存储到失效的存储时间；对于可修产品，存储寿命是指从开始存储到不可修复为止的存储时间。存储寿命试验一般需要较多的试验样品和长期的观察测量，才能对产品做出较好的预计和评价。

任何产品都有其一定的寿命，无论是处于存储状态还是工作状态。在整个寿命周期内，都要经历从诞生到存储、运输、待命、工作到失效的过程。在存储过程中，影响产品可靠性的因素有很多，除有环境因素的影响外，存储时间、存储方式等也都会对其造成影响。在每个过程当中，产品所处的环境不同，存储的时间也不同。



为保证产品的可靠性，就必须保证产品在任何过程中都能完成规定的动作而不失效。绝大部分的产品都是处于工作阶段的，其可靠性与工作环境、工作时间有密切的联系。但对于一些特殊的产品，例如电子系统电子器件、航天用电子器件，其使用时间是远远短于存储时间的，所以工作可靠性与存储时间和环境有很大关系。对这一类的特殊产品而言，存储时间和环境就成为研究其可靠性的一项重要指标。随着科学技术的高速发展，产品更新换代的周期越来越短，因而需要在较短时期内获得产品的可靠性指标和寿命等信息。但通常的存储寿命试验方法要耗费大量的试验时间、人力和物力，并且由于产品更新换代等问题，长时间存储寿命试验后得出的结果可能已经失去了实际意义。因此，为了缩短试验时间，需要进行加速存储寿命试验。

加速存储寿命试验是一种在不改变产品在实际存储条件下的失效机理，在不增加新的失效机理的前提下，用加大存储环境试验应力的方法加速产品失效，根据其试验结果预计正常存储环境应力下产品的存储寿命，或在一个相对短的时间内获得失效率数据的技术。

存储环境是指产品在存储过程中所能遇到的环境，是存储过程中影响产品的诸多因素的总和，按性质可分为自然存储环境与人工存储环境；按场所可分为库房环境、棚库环境、露天环境等。存储中对产品产生影响的因素主要有温度、湿度、霉菌、气压、腐蚀介质等，其中以温度和湿度的影响最大。

1.1.2 工作寿命试验

产品在规定的条件下施加规定应力的试验，称为工作寿命试验。

工作寿命试验提供产品在工作状态下的可靠性特征参数。由于工作寿命试验比较符合产品的实际使用情况，所以其试验结果是产品可靠性的主要指标之一。工作寿命试验分为间断工作寿命、稳态工作寿命试验，其中稳态工作寿命试验又分为静态工作寿命、动态工作寿命试验两种。

间断工作寿命试验是对产品间断地施加应力，使产品受到“开”和“关”之间周期变化的电应力，来加速产品内部物理、化学反应过程，而这种周期变化的电应力又导致产品和外壳温度的周期变化，最终得到测定产品的典型失效率或证实产品的质量或可靠性。

稳态工作寿命是验证承受规定条件的产品在整个工作时间内的质量或可靠性。在额定工作条件下持续施加额定应力而进行寿命试验，其试验时间应足够长，以保证其结果不具有早期失效或“初期失效”的特征，在寿命试验期间还应进行观察，以监视失效率是否随时间有显著变化。如果用稳态寿命试验来评定产品的基本能力或对产品进行鉴定试验，以确保产品以后能用于高可靠场合，就应选择适当的试验条件，如电输入、负载和偏置以及相应的最高工作温度或试验温度或其他规定的环境条件代表产品的最大工作额定值或试验额定值。静态工作寿命试验指产品进行稳态寿命试验时无信号输入，动态工作寿命试验则指产品进行稳态寿命试验时有信号输入。

1.1.3 加速寿命试验

加速寿命试验是指采用加大应力的方法促使样品在短期内失效，以预测在正常工作条件

或储存条件下的可靠性,但不改变受试样品的失效机理。

按照试验时施加应力的方式,加速寿命试验可分为恒定应力加速寿命试验、步进应力加速寿命试验和序进应力加速寿命试验。恒定应力加速寿命试验是指样品在试验期间所承受的应力保持不变;步进应力加速寿命试验是指样品在试验期间所承受应力按一定时间间隔阶梯式地增加,直至样品产生足够的退化为止;序进应力加速寿命试验是指样品在试验期间所受应力按时间等速增加,直至样品产生足够的退化为止。

1.2 寿命分布

产品出现故障是一种随机事件,产品的寿命是一个随机变量,因而产品的故障和寿命都可以用失效分布或寿命分布函数的形式来描述其规律。常用的分布有指数分布、正态分布及威布尔分布等。

1.2.1 指数分布及其特点

当元器件足够多、时间足够长时,失效率便趋近于一稳定值,其值大小只与工作条件和外部环境有关,而与产品的工作时间无关,产品的这种寿命分布规律称为指数分布。寿命分布服从指数分布规律的产品,当其失效率不同时,其可靠度也不同。不同失效率的可靠度与时间的关系如图 1-1 所示。

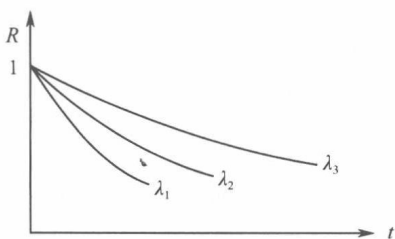


图 1-1 不同失效率的可靠度与时间的关系 ($\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$)

指数分布具有以下性质:

- 概率密度函数 $f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$;
- 可靠度函数 $R(t) = e^{-\lambda t}$;
- 累积失效概率 $F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$;
- 平均寿命 $\theta = \frac{1}{\lambda}$;
- 可靠寿命 $\rho_r = -2.303 \log R / \lambda$;
- 中位寿命 $\rho_{0.5} = 0.693 / \lambda$;
- 特征寿命 $\rho_{e-1} = 1 / \lambda$ 。

由此可见,指数分布的特点是:

- 失效率为常数;



- 平均寿命和特征寿命相同，均为失效率的倒数；
- 当产品工作至平均时间完结时，其可靠度下降到 36.8%。

1.2.2 正态分布及其特点

正态分布又称为高斯分布，应用范围十分广泛，诸如工艺误差、测量误差、产品参数值的分布等均符合正态分布。

正态分布具有如下性质：

- 概率密度函数 $f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2}$ ；
- 可靠度函数 $R(t) = 1 - \int_{-\infty}^t \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} dt$ ；
- 累积失效概率 $F(t) = \int_{-\infty}^t \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} dt$ 。

可见正态分布的特点是：

- 密度函数曲线的形状是中间高，两边低，左右对称，如图 1-2 所示；
- 含有两个未知参数，即均值 μ 和方差 σ ；
- 密度函数包络的面积为 1。



图 1.2 正态分布的概率密度函数

1.2.3 威布尔分布

威布尔分布是常用的一种寿命分布，凡是属于局部失效导致整体机能失效的链条模型，都可用这种分布来描述。

威布尔分布具有以下性质：

- 概率密度函数 $f(t) = \frac{m}{t_0} (t - \gamma)^{m-1} e^{-\frac{(t-\gamma)^m}{t_0}}$ ；
- 累积失效概率 $F(t) = 1 - e^{-\frac{(t-\gamma)^m}{t_0}}$ ；
- 可靠度函数 $R(t) = e^{-\frac{(t-\gamma)^m}{t_0}}$ ；
- 瞬时失效率 $\lambda(t) = \frac{m}{t_0} t^{m-1}$ 。

从概率密度函数中得知，威布尔分布含有三个未知数，即形状参数 m ，位置参数 γ ，尺度参数 t_0 。当这三个参数变化时，密度函数也相应发生变化。形状参数 m 接近 3.5 时，威布尔分布趋于正态分布；若 $\mu=1$ ，威布尔分布则成为指数分布，这时 t_0 值就相当于平均寿命值。

这三个未知参数的几何意义如下：

形状参数 m 表示概率密度函数的几何形状，如图 1-3 所示。

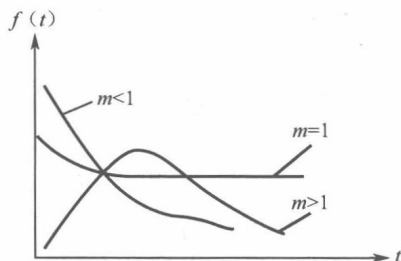


图 1-3 形状参数不同时的概率密度函数 ($t_0=1, \gamma=0$)

位置参数 γ 表示概率密度函数曲线 t 轴上的起始位置。如图 1-4 所示。

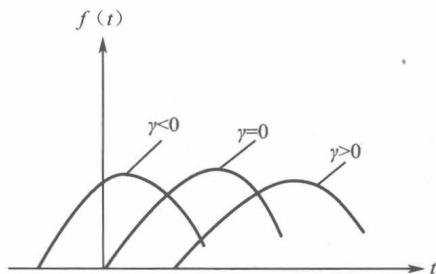


图 1-4 位置参数不同时的概率密度函数 (m 不变, $t_0=1$)

尺度参数 t_0 表示概率密度函数曲线与坐标轴的标尺比例，与曲线的形状无关。如图 1-5 所示。

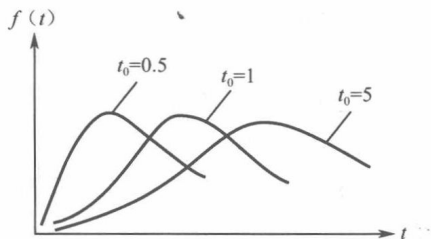


图 1-5 尺度参数不同时的概率密度函数 (m 不变, $\gamma=0$)

1.3 寿命试验方案设计

通过寿命试验可以评价产品的可靠性水平，了解产品失效分布规律和失效模式。通过对失效机理的分析，可以找出产品的失效原因，以便采取有效的改进措施，提高产品的可靠性水平。不同的电子产品，其寿命分布规律是不同的，有些产品的寿命服从指数分布，有些产品的寿命分布服从威布尔分布，有些产品的寿命分布服从对数正态分布。为了方便起见，往



往假定产品服从指数分布，据此进行试验设计并开展寿命试验。

任何设计合理、工艺成熟、质量控制严格的生产线上生产出来的产品都具有一定的可靠性，这类产品通过严格的工艺筛选剔除掉早期失效产品后，便进入偶尔失效期。在这段时期内，产品的寿命分布接近指数分布，即失效率 $\lambda(t)$ 接近于常数。这是产品在实际使用中较长的一段时期。指数分布的假设与某些元件的使用寿命和试验结果比较接近。实践也表明，即使不少元件的寿命是服从威布尔分布的，但当形状参数为 1 时，威布尔分布就变成指数分布了。在指数分布的情形下，产品可靠性特征量表达简单，只要掌握了产品的失效率就可以知道产品的全部分布特性，因此，可以利用它作为产品实际分布的一种近似。

1. 对试验样品的要求

试验样品必须在合格的批量产品中抽取，所抽取的样品必须能代表批量产品的特性。在确定试验样品的数量时，一方面要考虑试验结果统计分析的精确性，另一方面又要考虑试验的经济性，即样品的价格、所需的试验设备数量和测试工作量的大小。样品数量通常由产品的通用规范规定。

2. 试验条件的确定

寿命试验分为储存试验和工作寿命试验两大类。储存寿命试验的目的是了解产品在储存状态下的寿命特性，试验时只需施加一定的环境应力，而不必施加电负荷；工作寿命试验的目的是了解产品在工作状态下的寿命特性，试验时要施加产品技术条件所规定的额定温度和额定工作电压（或额定功率、额定电流）。

3. 试验截止时间的确定

试验时间是寿命试验中一个重要的问题。从提高统计分析的精确度角度来说，最好是做到全部样品失效才结束试验，但这需要很长时间。产品的可靠性水平越高，则达到相同失效数所需的时间就越长。从统计分析的角度来看，只要有一部分试验样品失效就可以停止试验，并称这种试验为中途截止试验（或称截尾试验）。寿命试验大部分是截尾试验。

对于低应力寿命试验，常采用定时截尾，即试验达到规定时间就停止（一般要求截止时间为平均寿命的 1.6 倍以上，如采用 1000 小时、2000 小时、5000 小时等）；对于高应力下的寿命试验，常采用定数截尾，即当累积失效数或累积失效概率达到规定值（一般在 30%、40%或 50%以上）时截止试验。

假定产品的寿命分布服从指数分布，并且知道产品的平均寿命为 θ ，试验样品数为 n ，如果要求试验中样品的失效数达到 r 便结束试验，则所需的试验时间大约为

$$t = \theta \cdot \ln \frac{n}{n-r} \text{ (小时)} \quad (1-1)$$

若事先对产品的平均寿命 θ 不了解，则可通过摸底试验把 θ 的数值大致估计出来。

4. 测量周期的确定

试验样品在试验过程中要按一定的周期进行测量，测量周期的长短与产品的失效类型和施加的应力大小有关。测量周期的选择直接影响到产品的可靠性指标的估计精度。测量周期的选定原则是在不过多地增加检查和测量工作量的情况下，能比较清楚地了解产品的失效分