

文章编号: 1000-6893(2005)05-0652-05

元器件应力筛选的有效性准则

谢劲松

(北京航空航天大学 可靠性工程研究所, 北京 100083)

Stress Screening Effectiveness Criteria

XIE Jinsong

(Institute of Reliability Engineering, Beijing University of Aeronautics and
Astronautics, Beijing 100083, China)

摘 要: 当一种元器件在经历了某个筛选试验以后其使用可靠度提高了, 就称该筛选试验是“有效的”, 否则就是“无效的”。如果对于一种元器件存在着一个有效的筛选试验, 就称这个元器件是“适合筛选的”, 否则, 这种元器件就“不适合于筛选”, 即不存在任何有效的筛选试验能提高该元器件的使用可靠度。从对元器件应力筛选的这样一个有效性准则的定义出发, 讨论并给出了与该定义相关数学问题的描述。此外, 还详细地讨论和从理论上证明了筛选前后失效率的不变性以及给出了筛选试验有效性的失效率准则与可靠度准则的相互关系。

关键词: 应力筛选; 筛选的有效性; 失效分布; 失效率; 可靠度

中图分类号: V215.7 **文献标识码:** A

Abstract: Stress screening is considered effective if and only if it leads to increased reliability. Consequently, a to-be-screened part is considered “screening-adequate” only when an effective screening test does exist to increase its reliability for its expected applications. In this paper, stress screening effectiveness criteria are discussed in terms of failure distribution and failure rate. Quantitative relationship between failure rate and failure distribution before and after screening is provided.

Key words: stress screening; effectiveness of screening; failure distribution; failure rate; reliability

加速应力筛选是一种为预防早期故障, 对产品施加短时的包括环境应力在内的高水平载荷, 从而发现和剔除带有制造缺陷个体的方法^[1,2], 典型的对电子元器件所进行的加速应力筛选如老炼 (burn-in) 和二次筛选^①, 这种加速应力筛选方法是目前用于减少元器件的早期失效、提高其使用可靠性的重要手段之一。

尽管加速应力筛选对于某些元器件, 如半导体集成器件, 已在一定程度上被实践证明是提高使用可靠性的一个有效手段, 但是这一方法对于提高元器件的使用可靠性是否具有普遍意义还存在着加速应力筛选的有效性和如何进行筛选试验设计这两方面的问题。

美国在对半导体集成器件的加速应力筛选方面的研究起步很早。例如, 在 1968 年, 老炼就已被纳入了美国军用标准 MIL-STD-883《微电路的试验方法标准》^[3,4]。早期的研究发现, 老炼对于提高小批量生产的尚未成熟半导体器件的使用可靠性效果明显。但其后的研究结果显示, 目前所采用的老炼方法存在着许多问题, 例如, 对国家半导体、摩托

罗拉和德州仪器等美国六大主要半导体厂商所生产的上百万器件的老炼数据进行的一项研究表明^[4], 老炼对于加速具有制造缺陷器件的失效有时作用不明显且还会给器件带来新的原本没有的破坏, 并使得老炼后器件的使用可靠性较未经老炼试验的器件反而有所下降。由此提出了加速应力筛选试验的有效性问题的。1994 年, 美国空军就曾指出: “尽管今天的半导体生产商仍在继续使用老炼来提高器件的可靠性, 但绝大部分的老炼试验都不切实际或是需要新技术对其加以改进”^[4]。

在最近几年国外对加速应力筛选的研究中, 尽管在筛选的有效性及量化设计方面的工作还都是集中在对单个案例且基本是局限在对半导体集成器件的研究上, 但对于筛选后元器件可靠性的定量化评估方法上已有了一些突破性的进展^[5~9]。例如, 2004 年由美国自然科学基金支持的关于 CMOS 器件栅氧化层失效以及器件可靠性的研究就定量地给出了老炼筛选后器件可靠性的变化, 根据这样的结果, 可以对 CMOS 集成器件的加速应力筛选试验进行量化设计, 尽管这种

收稿日期: 2005-05-09; 修订日期: 2005-07-25

^①二次筛选可包括老练

量化设计的有效性还只是局限于珊氧化层失效这一特定的失效机理上^[5]。

在中国, 元器件的有效加速应力筛选研究具有更为特殊的实际应用价值。由于中国在许多元器件的制造技术和工艺水平上还很有限, 众多元器件的固有可靠性达不到国外同类产品的水平, 一些军用以及其它具有高可靠性要求的产品需要依赖加速应力筛选来提高出厂元器件的使用可靠性。

加速应力筛选是一把双刃剑, 既可以用来剔除具有缺陷的产品, 也可能给合格产品造成损伤。由于中国在这方面理论研究的空白, 目前在实际工程应用中所使用的加速应力筛选方法尚无法回答诸如元器件在经过筛选后使用可靠性是否会提高、会提高多少、现有的筛选条件是否是最佳、是否需要改进和如何改进等等的问题, 所以, 对具体加速应力筛选试验条件的选取进行的完全是一种工程处理, 这使得加速应力筛选在提高实际元器件使用可靠性的有效性上大打折扣, 同时, 筛选的盲目性也无法避免^[10,11]。

作为一项针对元器件加速应力筛选的有效性在普遍意义上进行理论研究的前期工作, 本文从对元器件加速应力筛选有效性准则的定义出发, 讨论并给出了与该定义相关数学问题的描述。此外, 本文还详细地讨论和从理论上证明了筛选前后失效率的不变性, 同时给出了筛选试验有效性的失效率准则与可靠度准则的相互关系。

1 失效分布函数、可靠度和其它的可靠性参数

在讨论加速应力筛选有效性的数学描述以前, 先来看一下失效分布函数和可靠度的数学表达。首先, 一个元器件的失效分布函数可以表示成为一个具有 n 个应力载荷参数 σ_i 的密度函数

$$f(t; \sigma_i, i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

其中: t 为元器件的寿命 (Lifetime) 或故障前时间 (Time to Failure), 是该函数的随机变量; 而应力载荷参数 σ_i 则可视为该函数的普通变量。所以, 失效分布函数是随不同的环境载荷条件而有所变化的。

为方便起见, 该失效分布函数被简化地记为 $f(t; \sigma_i)$, 于是, 与此相对应的累计失效分布函数 $F(t; \sigma_i)$ 和可靠性函数 $R(t; \sigma_i)$ 就分别成为

$$F(t; \sigma_i) = \int_0^t f(t; \sigma_i) dt \text{ 和 } R(t; \sigma_i) = 1 - F(t; \sigma_i) \quad (2)$$

于是, 元器件在载荷条件 σ_i 下的平均寿命或平均

故障前时间 (MTTF)^② 为

$$MTTF = \int_0^{+\infty} t \cdot f(t; \sigma_i) dt \quad (3)$$

失效率 (Hazard Rate)^③ 函数 $\lambda(t; \sigma_i)$ 为

$$\lambda(t; \sigma_i) = \frac{f(t; \sigma_i)}{R(t; \sigma_i)} \quad (4)$$

2 元器件的固有失效分布、固有可靠度以及筛选前的使用可靠度

按照中国国家军用标准, 固有可靠度是在规定的使用和保障条件下, 通过设计和制造使产品所具有的可靠度; 使用可靠度则是指产品在实际的环境中使用时所呈现的可靠度^[2]。由于可靠度是一种概率, 固有可靠度和使用可靠度除了在上述定义中所明确的在环境应力及其它使用条件上的差异外, 还隐含着样本集合上的差异。固有可靠度所描述的样本是一个批次所有制造产品的集合; 而使用可靠度所描述的样本则是同样批次中最终投入了实际使用的产品集合。从前者集合样本中去除了在性能、质量、环境应力等筛选中不合格个体以后的样本集合为后者的集合。如将设计的使用条件参数记为 σ_{i0} 而实际的使用环境参数记为 σ_i , 则元器件的固有失效分布、固有可靠度以及筛选前的使用可靠度的数学表达依次为 $f(t; \sigma_{i0}), R(t; \sigma_{i0})$ 和 $R(t; \sigma_i)$ 。

3 经历了筛选试验后元器件的失效分布与使用可靠度

在经历了筛选试验后, 所有的元器件将丧失至少一部分的使用寿命, 而且, 那些丧失了所有寿命, 即在试验中失效的个体, 将在试验后被剔除。假定在实际的使用环境条件 σ_i 下, 寿命低于 t_{0E} 的元器件个体为早期失效个体且在筛选试验中被剔除 (见图 1), 同时定义如下的随机事件:

A: 在任一工作时刻 $t > t_{0E}$, 元器件发现已失效 (即元器件寿命小于 t_{0E})

B: 在工作时刻 t_{0E} , 元器件仍工作正常 (即元器件寿命大于 t_{0E})

则对于一个已知寿命大于 t_{0E} 的元器件个体, 其寿命小于 t 的概率即由如下的条件概率来确定

^① 因元器件没有维修的问题, 故元器件的平均故障前时间也即为元器件的平均寿命, 这两个名词在本文中不加区分。

^② 根据 MIL-HDBK-338B Electronic Reliability Design Handbook^[1], Failure Rate 是指一段时间内的平均失效率, 而 Hazard Rate 则是针对连续失效函数在某一时刻的瞬时失效率, 即平均失效率在该时刻的极限。本文在中文的名称使用上对这两个概念未进行专门区分。

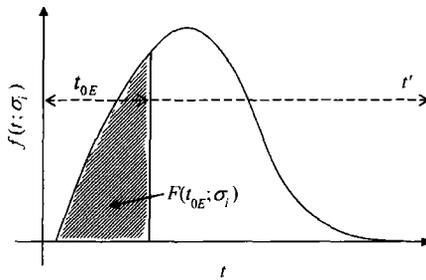


图1 实际的使用环境条件下的失效分布

Fig. 1 Failure distribution under actual application environment

$$Pr(A | B) = \frac{Pr(AB)}{Pr(B)} = \frac{\int_{t_{0E}}^t f(t; \sigma_i) dt}{1 - \int_0^{t_{0E}} f(t; \sigma_i) dt} \quad (5)$$

其中: $Pr(AB)$ 是元器件寿命大于 t_{0E} 但小于 t 的概率; $Pr(B)$ 是元器件寿命大于 t_{0E} 的概率。所以, 整理一下式(5)即得到如下剔除了寿命小于 t_{0E} 个体后元器件的失效分布函数

$$Pr(A | B) = \frac{F(t; \sigma_i) - F(t_{0E}; \sigma_i)}{1 - F(t_{0E}; \sigma_i)} \quad (6)$$

由于经历了筛选后元器件的实际使用寿命并不包含筛选试验所带来的寿命损耗, 即元器件的原有使用寿命 t 中应除去寿命损耗 t_{0E} , 于是, 如考虑元器件的实际使用寿命 $t' = t - t_{0E}$ (亦见图1), 元器件的失效分布函数 $F'(t', \sigma_i)$ 成为

$$F'(t'; \sigma_i) = \frac{F(t' + t_{0E}; \sigma_i) - F(t_{0E}; \sigma_i)}{1 - F(t_{0E}; \sigma_i)} \quad (7)$$

这里需要考虑的是, 利用应力筛选试验来剔除低寿命元器件个体通常是在加速的环境应力条件下进行的, 假定这种加速的试验条件参数为 σ_{is} , 试验时间为 t_0 , 则与这一试验时间等效的、在实际使用条件下的寿命损耗 t_{0E} 就可通过等量化失效概率来获得(见图1和图2的阴影部), 即

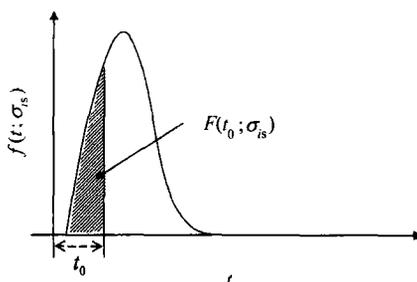


图2 加速应力筛选条件下的失效分布

Fig. 2 Failure distribution under accelerated stress screening condition

$$F(t_{0E}; \sigma_i) = F(t_0; \sigma_{is}) \quad (8)$$

这样, 在经历了条件为 σ_{is} 、时间为 t_0 的加速应力筛选试验后, 元器件在实际使用环境条件下的累计失效分布函数就为式(7), 其中的寿命损耗 t_{0E} 由式(8)给出, 将式(7)代入(2)的第二式即可得到该元器件的使用可靠度。

4 元器件加速应力筛选的有效性准则

元器件加速应力筛选的有效性, 应该由元器件在筛选试验后使用可靠度的变化情况来决定。如果一种元器件在经历了某个筛选试验以后其使用可靠度提高了, 该筛选试验就称为是“有效的”, 否则就是“无效的”。如果对于一种元器件存在着一个有效的筛选试验, 这个元器件就称作是“可筛选的”或“适合筛选的”, 否则, 这种元器件就是“不适合筛选的”, 即不存在任何有效的筛选试验能提高该元器件的使用可靠度。

(1) 可靠度准则 根据这样的定义, 对于任何一个有效的筛选试验, 在筛选后的任一使用时间 τ 范围内, 元器件的失效概率应小于筛选前的概率, 即

$$F'(\tau; \sigma_i) < F(\tau; \sigma_i) \quad (9)$$

将式(7)代入此关系后得到不等式

$$\frac{F(\tau + t_{0E}; \sigma_i) - F(t_{0E}; \sigma_i)}{1 - F(t_{0E}; \sigma_i)} < F(\tau; \sigma_i) \quad (10)$$

对此不等式稍加整理即可得到如下形式的加速应力筛选有效性准则的数学表达式

$$F(\tau + t_{0E}; \sigma_i) + F(\tau; \sigma_i)F(t_{0E}; \sigma_i) - F(t_{0E}; \sigma_i) - F(\tau; \sigma_i) < 0 \quad (11)$$

这样, 对于任意元器件及其实际的使用环境条件 σ_i , 总存在着该元器件在此条件下的失效分布函数 $F(t; \sigma_i)$ ^④, 如果同时还存在着某一时间 t_{0E} 使关系(11)得到满足, 则意味该元器件是适合筛选的或存在着有效的筛选试验。

例如, 对于满足指数失效分布、即下式

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \text{ 或 } F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (12)$$

的元器件来说, 将式(12)代入上面筛选有效性准则的表达式(11)并整理以后可以发现: 该不等式的左边项为零、对于任意的时间 t_{0E} 均无法得到满足, 所以, 呈指数失效分布的元器件不适合于筛选。

(2) 失效率准则 与由可靠度在理论上给出了上述完整的筛选有效性的条件相比较, 由失效率来定义筛选的有效性, 其数学表达式的物理含

^④ 这一函数亦总是可以找到的, 例如通过寿命试验。

义显得更为直接和明了。

在由失效率来定义加速应力筛选的有效性以前,首先来看一下失效率与可靠度的一一对应关系。首先,在已知可靠性函数或失效函数的前提下,失效率是由其自身的定义式(4)给出的。反之,如果已知失效率函数 $\lambda(t)$,可靠度则可由下式给出^[12]

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(s) ds} \quad (13)$$

由此可知,失效率与可靠度是一一对应的。

于是,筛选有效性的失效率准则就要求元器件筛选后的失效率要低于其原有的失效率。其相应的数学描述为:对于任何一个有效的筛选,在筛选后的任一使用时间 τ 范围内,元器件的失效率小于其原有的失效率,即

$$\lambda'(\tau; \sigma_i) < \lambda(\tau; \sigma_i) \quad (14)$$

考察筛选后失效率函数 $\lambda'(t'; \sigma_i)$ (或简记为 $\lambda'(t')$)后可以发现,在刨除了筛选中的寿命损耗外,筛选前后的失效率是不变的(详细的证明过程参见附录A),即

$$\lambda'(t') = \lambda(t) \quad (15)$$

其中: $t = t' + t_{0E}$ (见图1)。于是,条件式(14)要求失效率函数为递减函数,即在式(14)中考虑了式(15)后可以得到

$$\lambda'(\tau) = \lambda(\tau + t_{0E}) < \lambda(\tau) \quad (16)$$

同时考虑到这一失效率准则对于筛选有效性的充分但非必要性,可知具有递减失效率函数的元器件一定是适合筛选的,但并非所有适合筛选的元器件都一定满足此条件。有关失效率准则与可靠度准则的相互关系的证明详见附录B。

5 结束语和后续工作

总结上述讨论可知,元器件适合于加速应力筛选的条件是:存在一个环境应力条件 σ_{is} 时间 t_0 的筛选使得不等式(11)和式(8)成立。

在获得对元器件加速应力筛选有效性准则的数学描述以后,后续的研究内容将包括:元器件能够进行有效筛选所具有的失效分布特性、该失效分布特性与元器件失效机理及个体分散性之间的关系、元器件是否可进行有效筛选的评估方法以及加速应力筛选的量化设计方法等研究。

参 考 文 献

- [1] MIL-HDBK-338B, Electronic reliability design handbook [S]. The United States Department of Defense. 1998.

- [2] GJB 451-1990, 可靠性维修性术语[S]. 1990.
GJB 451-1990, Reliability and maintainability terminology[S]. 1990. (in Chinese)
- [3] MIL-STD-883E, Test method standard-microcircuits[S]. The U. S. Department of Defense. 1996.
- [4] Pecht M G, Radojcic R, Rao G. Guidebook for managing silicon chip reliability[M]. Boca Raton CRC Press. 1999.
- [5] Kim K O, Kuo W, Luo W. A relation model of gate oxide and reliability[J]. Microelectronics Reliability, 2004, 44 (3): 425-434.
- [6] Wu C L, Su C T. Determination of the optimal burn-in time and cost using an environmental stress approach: a case study in switch mode rectifier[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2002, 76(1): 53-61.
- [7] van der Pol J, Ooms E, Hof T, *et al.* Impact of screening of latent defects at electrical test on yield reliability relation and application to burn-in elimination[A]. International Reliability Physics Symposium [C]. 1998. 370-377.
- [8] Huston H H, Clarke C P. Reliability defect detection and screening during processing: theory and implementation [A]. Proceedings of International Reliability Physics Symposium [C]. 1992. 268-75.
- [9] Moazzami R M, Hu C. Projecting gate oxide reliability and optimizing reliability screens[J]. IEEE Trans Electron 1990, 37: 1643-1650.
- [10] 欧小莉. 电子元器件的二次筛选[J]. 可靠性工程, 2004, 3 (2): 83-86.
Ou X L. Re-screening of electronic parts[J]. Reliability Engineering, 2004, 3(2): 83-86.
- [11] 欧小莉. 进一步提高对电子元器件二次筛选作用的认识 [J]. 可靠性工程, 2004, 3 (4): 182-183.
Ou X L. Understanding the role of electronic parts screening[J]. Reliability Engineering, 2004, 3(4): 182-183. (in Chinese)
- [12] Helstrom W C. Probability and stochastic processes for engineers[M]. New York: Macmillan Publishing Company, 1984.

作者简介:



谢劲松(1966-) 男(汉族),北京人,北京航空航天大学工程系统工程系(可靠性工程研究所)副教授,博士,现主要从事可靠性工程、电子产品可靠性、故障物理等方面研究。电话:(010)82316435

附录 A: 筛选前后失效率的不变性

在求解筛选前后失效率的关系之前先来找到失效分布函数的关系。首先,存在如下的微分关系

$$f'(t') = \frac{dF'(t')}{dt'} \quad (A. 1)$$

将式(7)代入此关系并整理后得到

$$f'(t') = \frac{1}{1-F(t_{0E})} \cdot \frac{dF(t'+t_{0E})}{d(t'+t_{0E})} = \frac{f(t'+t_{0E})}{1-F(t_{0E})} \quad (\text{A.2})$$

于是,考虑了关系 $t=t'+t_{0E}$ 后即得到如下筛选前后失效分布函数的关系

$$f'(t') = \frac{f(t)}{1-F(t_{0E})} \quad (\text{A.3})$$

再将关系式(7)和式(A.3)均代入筛选后失效率的表达式并整理后即得到

$$\lambda'(t') = \frac{f(t)}{1-F(t'+t_{0E})} = \frac{f(t)}{1-F(t)} \equiv \lambda(t) \quad (\text{A.4})$$

附录 B: 筛选有效性的失效率准则与可靠度准则的相互关系

如下的考察可以看出失效率准则对于可靠度准则来说是充分的。假定某筛选满足有效性的失效率准则,即

$$0 \leq \lambda'(\tau) < \lambda(\tau) \quad (\text{B.1})$$

则,

$$e^{-\int \lambda'(\tau) d\tau} > e^{-\int \lambda(\tau) d\tau} > 0 \quad (\text{B.2})$$

考虑失效分布函数和失效率的关系后可以得到如下的不等式

$$F'(\tau) = F(\tau) \quad (\text{B.3})$$

所以,根据式(9)知该试验也满足有效性的可靠度准则。但是,通过下面一个特例可知,反之并不成立,即失效率准则不能成为筛选试验有效性的必要条件。

假定有失效分布函数 $F(t; \sigma_i)$, 它所对应的失效率函数为 $\lambda(t; \sigma_i)$ 并如图 3 所示。筛选后将产生的寿命损耗, 根据前述筛选前后失效率的不变性原则, 与失效分布函数 $F'(t'; \sigma_i)$ 相对应的失效率函数将成为 $\lambda'(t'; \sigma_i)$ 并如图 3 所示。如假定图 3 中的阴影部面积 A_2 在所有的几何尺寸上, 包括长、宽和面积均远小于 A_1 , 且它们之间的距离远大于 t_{0E} , 则容易看出, 对任意的 $\tau > 0$, 均成立

$$\int_0^{\tau} \lambda(t; \sigma_i) dt > \int_0^{\tau} \lambda'(t'; \sigma_i) dt' > 0 \quad (\text{B.4})$$

考虑式(13)后可知

$$F(\tau; \sigma_i) > F'(\tau; \sigma_i) > 0 \quad (\text{B.5})$$

所以, 这样的筛选满足筛选试验有效性的可靠度准则, 因此是一个有效的筛选, 但显然从图 3 中可以看出

$$\lambda(\tau; \sigma_i) \not\geq \lambda'(\tau; \sigma_i) \quad \forall \tau > 0 \quad (\text{B.6})$$

即这一筛选不满足有效性的失效率准则。

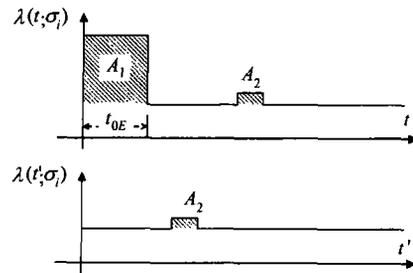


图 B.1 失效率准则的非必要性案例

Fig. B.1 The non-necessity case of failure rate criteria

(责任编辑:李铁柏)