

基于加速退化试验数据的可靠性分析

Reliability Analysis from Accelerated Degradation Tests

赵建印, 孙 权,

彭宝华, 周经伦

(国防科学技术大学 信息系统
与管理学院系统工程系, 长沙
410073)

Zhao Jian-yin, Sun Quan, Peng

Bao-hua, Zhou Jing-lun

(School of Information System &
Management, National University of
Defense Technology, Hunan, Changsha
410073, China)

摘 要: 本文研究了基于加速退化试验数据的可靠性评估技术, 给出了加速退化方程和加速退化因子的定义并结合实例研究了加速退化失效模型的可靠性统计推断方法。在工程问题中使用加速退化试验将更能节省时间和费用。

关键词: 可靠性; 加速试验; 退化失效

中图分类号: TN306

文献标识码: A

文章编号: 1003-0107(2005)07-0030-04

Abstract: A model and analyses for accelerated degradation data are described in this article. Also described is a method for estimating the distribution of time to failure.

Key words: Reliability; Accelerated tests; Degradation failure

CLC number: TN306

Document code: A

Article ID: 1003-0107(2005)07-0030-04

一. 引言

在可靠性理论中, 产品丧失规定功能的现象称为失效, 产品的失效通常是产品内在失效机理与产品外部环境和工作条件综合作用而产生的, 这一般是一个复杂的过程。但从失效的形式上来看, 产品失效可以分为两种类型: 若产品在以往的工作或存储过程中, 一直保持或基本保持所需要的功能, 但在某一时刻, 这种功能突然完全丧失, 则称这种失效现象为突发型失效, 如器件击穿、电路短路、材料断裂等; 若产品在以往的工作或存储过程之中, 产品的功能表征量(一个或多个性能参数)随时间的延长而逐渐缓慢的下降, 直至达到无法正常工作的状态(通常规定一个判定的临界值, 即退化失效标准), 则称这种失效现象为退化型失效, 如磨损、老化、腐蚀等引起的失效均属于这种失效。

传统的可靠性分析方法是以寿命数据(失效时间)分析为基础的, 通过对寿命数据的统计分析确定产品的寿命分布类型并基于此对产品进行可靠性评估、预计等。这种分析方法在分析过程中将突发失效模

式与退化失效模式统一处理, 分析结果反映的是总体在给定条件下的“平均属性”, 不能反映动态环境对产品工作状态的影响, 它比较适合于技术复杂性比较低和大规模的产品。但是, 随着设计、制造方法以及使用材料的不断提高与改善, 产品的可靠性越来越高, 寿命越来越长, 在相对短期内几乎不可能失效, 因此很难获得失效数据。这些情况的出现给传统可靠性分析带来了一些新问题, 由于无法得到足够的失效数据, 这使得基于失效数据分析的传统可靠性分析方法很难使用或分析结果与工程实际偏差较大。如果产品的失效属于退化型失效, 那么可以使用性能退化分析代替传统的失效数据分析来进行产品的可靠性评估。实际上, 相对于失效数据来说, 产品的退化数据包含更多的可靠性信息, 另外, 通过产品的退化信息进行可靠性分析更节省试验时间和费用。基于性能退化数据进行可靠性分析是解决高可靠性、长寿命产品可靠性评估问题的解决途径之一, 1988年Nair就曾指出退化数据对可靠性评估来说是一个丰富的信息源[1], 文献[2]也认

为系统退化以及利用退化的观点来研究系统可靠性是一个值得深入研究的课题, 它可能会为系统可靠性研究开辟一条新的途径。

已经有许多的学者对基于退化数据进行可靠性分析进行了研究, 该问题也越来越受到重视。文献[3][4]对相关的研究做了较好的总结。[5]的工作对退化失效模型的一些问题做了讨论, 而且在相当一般的条件下, 提出了一些解决问题的方法。[6]的工作更进一步, 他采用多重多元回归模型来描述产品的退化过程, 该模型包含了[5]所给出的模型。文献[7]对退化失效分析的一般模型做了一些探讨并得到了一些有用的结果。另外还有一些类似文献, 这里就不再一一列出了。

在很多实际问题中, 产品在其工作环境中的退化过程极其缓慢, 有时在很长的测量周期内, 退化量的变化微乎其微, 甚至这种微小的变化都比不上测量误差, 这种情况在长寿命产品中尤为显著, 此时则可以考虑提高某型应力水平, 使退化加速。加速退化失效问题至今研究的不多, [8]利用加速退化数据研究了一种电介质电压击穿寿命问

题, [9] 对一种感应电机进行了加速退化试验分析。[7] 采用加速寿命方程对几个特定模型进行了分析。本文在现有文献的基础上, 研究了加速退化失效问题一般概念和相关模型。

二. 加速退化方程与加速退化因子研究

产品退化是一个无法预知的过程, 我们把它看成一个随机过程, 设 t 时刻退化量 x 的分布函数为 $G(x; t)$, 相应的概率密度函数为 $g(x; t)$ 。为产品退化量超过失效阈值而导致产品退化失效的时间, 根据退化失效判据, 产品在 t 时刻的失效概率为

$$\begin{aligned} F_s(x, t) &= P(T_s \leq t) \\ &= P(x(t) \geq 1) \\ &= 1 - G_s(1; t) \end{aligned} \quad (1)$$

其中 x 表示 t 时刻 $x(t)$ 的取值, 即 $x = x(t)$ 。图 1 给出退化失效的图示。

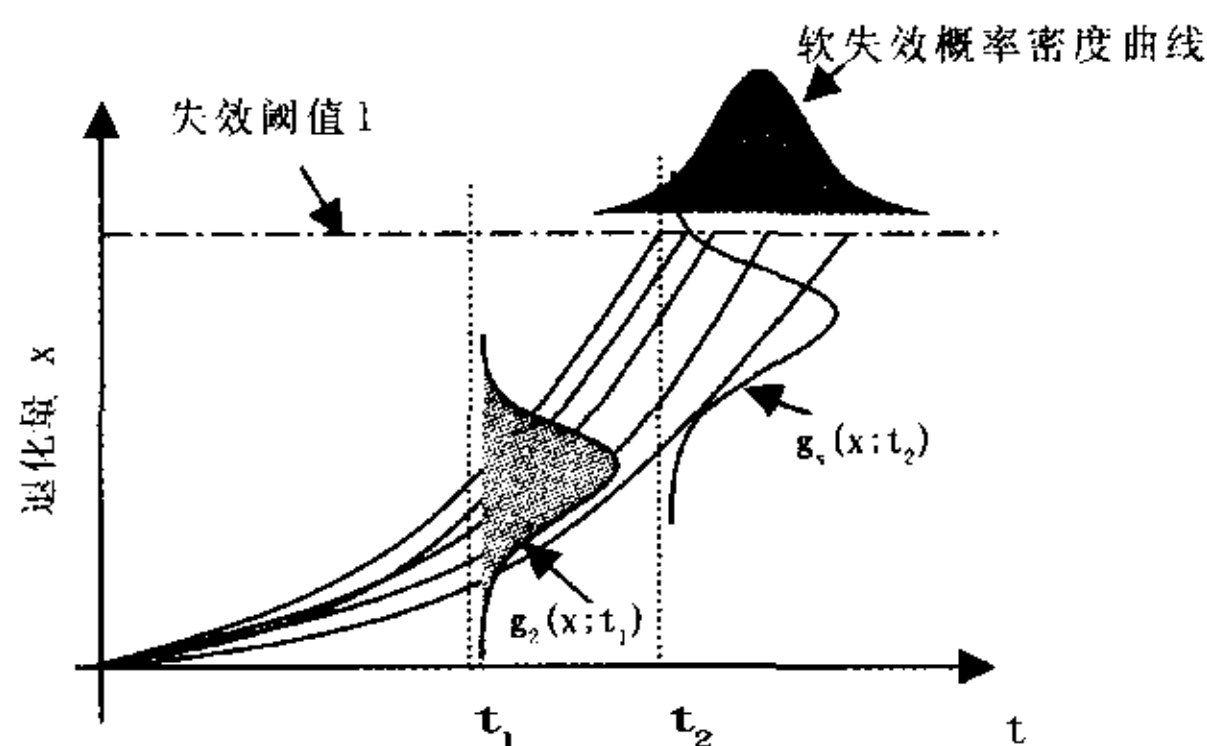


图 1 不同时刻对应的退化量分布密度函数

设加速退化试验中加速应力水平为 $S_1, S_2, \dots, S_q$, 共 q 中应力水平, 它们均高于正常应力 S_0 。在某一应力水平下的不同时间点上对试验样品进行测量可获取退化数据。试验数据的形式为

$$\{(x_{ijk}, t_{jk}); i=1, 2, \dots, q, j=1, 2, \dots, m_i, k=1, 2, \dots, n_j\}$$

其中 m_i 表示应力水平 S_i 下投放的样品个数, n_j 表示第 j 个样品的测量次数。

加速方程和加速因子是加速试验中的两个非常重要的概念, 加速寿命试验中称为加速寿命方程, 它反映了产品寿命特征与应力的关

系, 而加速退化试验中的数据记录的是产品性能退化量, 加速退化方程则应能反映退化特征量与应力的关系, 目前还没有文献对加速退化方程和加速退化因子进行研究。下面我们研究它们的一般定义, 首先研究加速退化因子。

a) 加速退化因子一般定义

加速因子是反映加速试验中某一加速应力水平效果的量, 在实际中用处很多, 利用它可以将各加速应力水平下的试验数据进行折算, 因此在信息融合研究中加速因子又被称为环境因子。加速退化试验中所记录的试验数据不仅包括不同时刻产品的退化量大小, 还包括退化量的测取时间, 即试验数据包括两种信息: 退化量和时间, 进行数据折算时可能根据需要折算这两类信息中的任一种, 基于此, 可以定义两种类型的加速因子。

为给出加速退化因子的定义, 先引入 α -退化累积时间的定义。

【定义: α -退化累积时间】产品在应力水平 S_i 下, 用 $\{x_i(t); t \geq 0\}$ 表示产品特性参数退化的随机过程, 其中 t 是试验时间, $x_i(t)$ 是时间区间 $[0, t]$ 上产品特性参数的退化量, 其均值函数记为 $h_i(t) = E[x_i(t)]$, 对于给定的退化量 $\alpha > 0$, 方程 $h_i(t) = \alpha$ 的根为

$$t_{\alpha, i} = h_i^{-1}(\alpha)$$

则称 $t_{\alpha, i}$ 为产品在应力水平 S_i 下的 α -退化累积时间。

利用该定义, 我们给出加速因子的一般定义:

【定义: I-型加速退化因子】对给定的退化量 $\alpha > 0$, 在应力水平 $S_i, S_j (i \neq j)$ 下, 产品的 α -退化累积时间分别记为 $t_{\alpha, i}$ 和 $t_{\alpha, j}$, 则它们的比值

$$K_{ji}^1(\alpha) = \frac{t_{\alpha, j}}{t_{\alpha, i}} \quad (2)$$

称为产品的应力水平 S_j 对应力水平 S_i 的 I-型加速退化因子函数,

在不至于引起混淆的情况下简称为 I-型加速退化因子。

【定义: II-型加速退化因子】对给定时刻 $t > 0$, 在应力水平 $S_i, S_j (i \neq j)$ 下, 产品特征值退化量期望分别记为 $h_i(t) = E[x_i(t)]$ 和 $h_j(t) = E[x_j(t)]$, 则它们的比值

$$K_{ji}^2(t) = \frac{h_i(t)}{h_j(t)} \quad (3)$$

称为产品的应力水平 S_j 对应力水平 S_i 的 II-型加速退化因子函数, 在不至于引起混淆的情况下简称为 II-型加速退化因子。

I-型加速退化因子反映的是两种应力水平下, 产品特征值退化量达到某一预定值时间的比较。II-型加速退化因子则反映的是同等时间长度内产品在不同应力水平下累积退化量期望值的比较。无论是 I-型还是 II-型加速退化因子, 它们都能反映应力加速的效果。值得注意的是, 如果 $S_j > S_i$, 则产品的应力 S_j 对 S_i 的 I-型加速退化因子 $K_{ji}^1 \geq 1$, II-型加速退化因子 $0 < K_{ji}^2 \leq 1$, 如果这两个因子接近于 1, 则加速应力就没有起到加速的作用。加速退化应可通过加速退化方程得到, 下面我们研究加速退化方程的一般概念。

b) 加速退化方程的一般定义

加速方程反映了特征量与应力水平的关系, 其重要性在于: 通过加速试验数据的分析, 确定加速方程 (一般是利用数据确定方程中参数的估计), 然后再由加速方程对正常应力水平下的特征量做出推断。基于寿命数据的加速方程表示的是寿命特征量与应力水平间的函数关系, 而退化试验所关心的是产品的退化情况, 因此应研究退化特征量与产品应力的关系。

物体的损坏或退化, 若从微观上看则是起源于由于外力的作用而导致的原子、分子的变化反应, 这种反应会导致产品性能逐渐退化。

一般来说, 当对材料、元件有害的反应持续到一定限度, 失效即随之发生, 实际工程中的大部分退化失效均符合这种失效过程。在导致产品性能退化的内部的反应过程中存在着能量势垒, 跨越这种势垒所必需的能量当然是由环境(应力)提供的, 如图2所示。并且, 越过此能量势垒(称为激活能 ΔE)进行反应的频数是按一定概率发生的, 服从所谓玻尔兹曼分布。在某一时刻, 此反应速度 K_t 与温度的关系, 是19世纪Arrhenius从经验中总结得到的^[10], 因而被称为Arrhenius方程。

$$K_t = \Lambda_t e^{-\Delta E/RT} = \Lambda_t e^{-B/T} \quad (4)$$

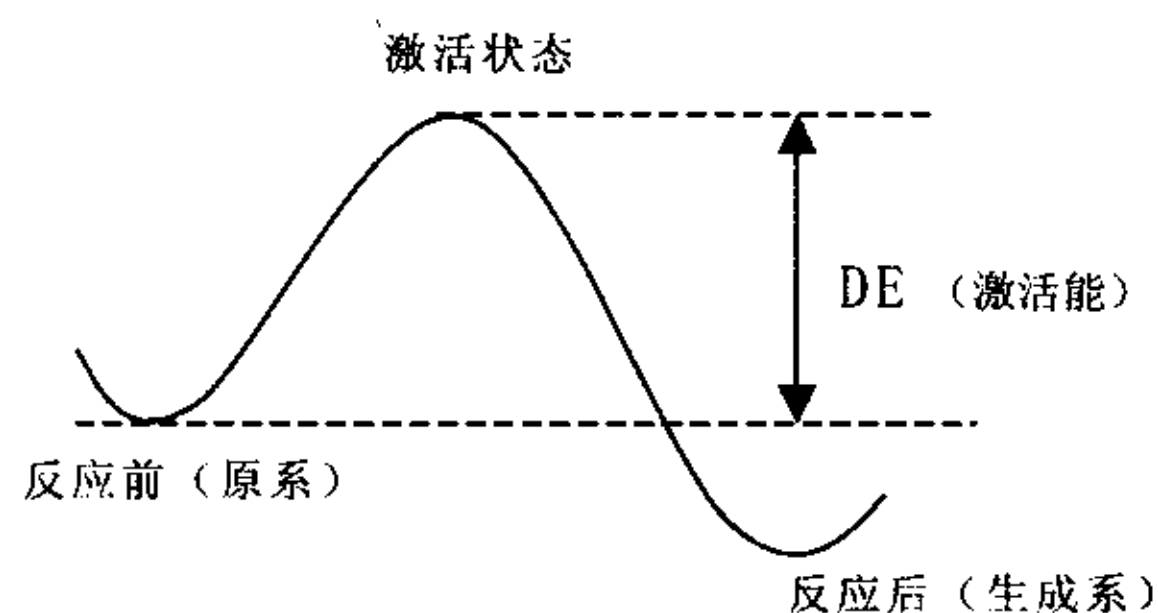


图2 激活能

K_t 为 t 时刻的反应速度即退化速度, Λ_t 为频数因子, ΔE 为每一毫升体积的激活能, R 是气体常数(等于1.99卡/摩尔·尔格), T 是绝对温度。对于除温度以外还包括其它应力 S 的普遍性情况, 如幂律模型

$$K_t = \Lambda_t e^{-B/T} S^b$$

指数型模型

$$K_t = \Lambda_t e^{\beta \cdot S}$$

和Arrhenius模型也是一致的^[10], Arrhenius模型、幂律模型、指数型模型正是加速试验中的常用加速模型^[11], 模型中 t 时刻的退化速度 K_t 反映了产品在该时刻退化的快慢, 我们设产品退化量期望函数 $h(t)$ 存在导数, 则有

$$\frac{dh(t)}{dt} = \frac{dE[x(t)]}{dt} = K(t) \quad (5)$$

以Arrhenius模型为例, 有

$$h(t) = \int_0^t dh(\tau) = \int_0^t \Lambda(\tau) e^{-\Delta E/RT} d\tau = \left(\int_0^t \Lambda(\tau) d\tau \right) e^{-\Delta E/RT}$$

记 $A(t) = \int_0^t \Lambda(\tau) d\tau$, 则上式变为

$$h(t) = A(t) \cdot e^{-\Delta E/RT} \quad (6)$$

或对数形式

$$\ln(h(t)) = a(t) + b/T \quad (7)$$

其中 $a(t) = \ln(A(t))$, $b = -\Delta E/R$ 。对其它加速模型也有类似的形式, 因此我们引出加速退化方程的定义。

【定义: 加速退化方程】记 $\xi(t)$ 为产品退化量 $x(t)$ 的某特征值或退化量随机过程的某参数, 如下方程

$$\xi(t) = A(t) e^{b(t) \varphi(s)} \quad (8)$$

或对数形式

$$\ln(\xi(t)) = \alpha(t) + b(t) \cdot \varphi(s) \quad (9)$$

称为加速退化方程, 其中 S 为应力水平, $\varphi(S)$ 是与退化量和时间无关的应力的函数, $\alpha(t) = \ln(A(t))$ 和 $b(t)$ 是与退化量和应力无关的时变参数。

加速退化方程反应了某一时刻产品退化特征与所受应力间的关系。

三. 基于加速退化方程的可靠性统计推断

按照应力施加方式不同, 加速退化试验中可采用: 恒定加速应力、步进加速应力和序进加速应力三种应力施加方式。这里我们仅对恒定应力加速退化试验进行分析。

加速退化方程描述了产品退化特征量和应力水平间的关系, 利用高应力水平下的性能退化数据求得方程中未知参数的值即可外推到正常应力下产品退化的情况。因此加速退化失效问题的关键是求得模型的加速退化方程。下面我们结合一个算例来分析基于加速退化数据的统计推断。

图3所示的是某电子产品在高于正常工作电压下的退化量随时间的变化情况, 电压的单位是 kV , 该电子产品的额定工作电压 $V_0 = 23 kV$, 加速退化试验中的两种加速电压分别为 $V_1 = 30 kV$, $V_2 = 35 kV$, 每种加速电压下各使用 $m = 4$ 个样品进行性能退化试验, 样品每运行1000次测量一

次退化量, 每个样品共测量10次, 产品的退化失效阈值 $i = 2.8$ 。图中虚线为 $35 kV$ 下的退化数据, 实线为 $30 kV$ 下的退化数据。

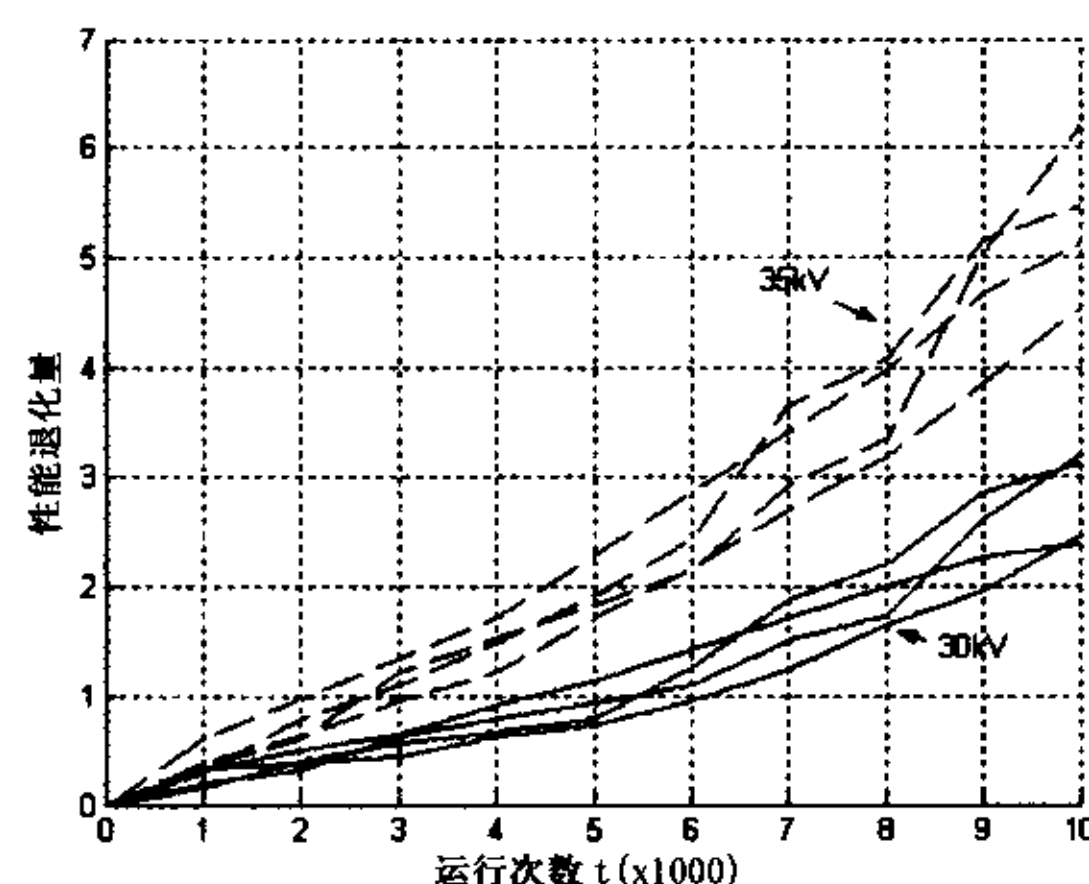


图3 加速退化数据图

设产品退化量 $x(t) \sim N(\mu(t), \sigma^2(t))$, 即产品退化为高斯过程。其均值和方差均为时变参数。由式(1), 产品 t 时刻的失效概率为

$$F(t) = P\{x(t) \geq l\} = 1 - \Phi\left(\frac{l - \mu(t)}{\sigma(t)}\right) \quad (10)$$

当退化量服从正态分布时, 一般可假设其方差函数与应力水平无关, 由于 $E[x(t)] = \mu(t)$, 则该模型的加速退化方程为

$$\mu_v(t) = \alpha(t) V^b \quad (11)$$

其中 b 是一个与激活能有关的参数。

设退化量方差函数 $\sigma^2(t)$ 和(11)式中时变参数 $\alpha(t)$ 均为线性函数, $t=0$ 时刻 $x(t)=0$, 故记, $\alpha(t) = k_1 t$, $\sigma^2(t) = k_2 t$, 则模型的未知参数为 k_1, k_2, b , 下面我们利用试验数据对这三个参数进行估计。

对于固定的 $i(i=1, 2)$, 利用数据 $\{x_{ijk}, j=1, 2, \dots, m, k=1, 2, \dots, n\}$, 可求得每个测量时刻 t_k 处退化量均值和方差的估计值

$$\hat{\mu}_{i,k} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m x_{ijk}, \quad \hat{\sigma}_{i,k}^2 = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (x_{ijk} - \hat{\mu}_{i,k})^2 \quad (k=1, 2, \dots, n)$$

另记 $k_1 V_1^b = r_1$, $k_1 V_2^b = r_2$, 两种应力水平下容值退化量 $x(t)$ 的均值函数分别为 $\mu_1(t) = k_1 V_1^b t = r_1 t$ 和 $\mu_2(t) = k_1 V_2^b t = r_2 t$; 由数据 $\{(\hat{\mu}_{i,k}, \hat{\sigma}_{i,k}^2); k=1, 2, \dots, n\} (i=1, 2)$ 可求得参数 r_1, r_2 的最小二乘估计 $\hat{r}_1 = 0.2421, \hat{r}_2 = 0.4734$, 以及 k_2 在两种应力水平数据下的估计值 $\hat{k}_{2,i} (i=1, 2)$, k_2 与应力无关, 则进一步有

$$\hat{k}_2 = \frac{(\hat{k}_{2,1} + \hat{k}_{2,2})}{2} = 0.0221;$$

$$\text{由 } \frac{r_2}{r_1} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^b, r_1 = k_1 V_1^b,$$

可得

$$\hat{b} = \frac{\ln(\hat{r}_2/\hat{r}_1)}{\ln(V_2/V_1)} = 4.3507, \hat{k}_1 = \frac{\hat{r}_1}{V_1^b} = 9.0669 \times 10^{-8},$$

因此正常电压水平 $V_0 = 23\text{kV}$ 下, 该电子产品退化量均值函数和方差函数分别为

$$\mu_0(t) = \hat{k}_1 V_0^b \cdot t, \sigma_0^2(t) = \hat{k}_2 t$$

将其以上结果代入到(10)中, 可得该电子产品正常应力水平下的失效概率函数为

$$F(t) = \Phi\left(\frac{\hat{k}_1 V_0^b t^{1/2}}{\sqrt{\hat{k}_2}} - \frac{1}{\sqrt{\hat{k}_2}} t^{-1/2}\right) = \Phi(0.5120 \cdot t^{1/2} - 18.8152 \cdot t^{-1/2})$$

图4给出了该电子产品在正常应力水平下的失效概率曲线。

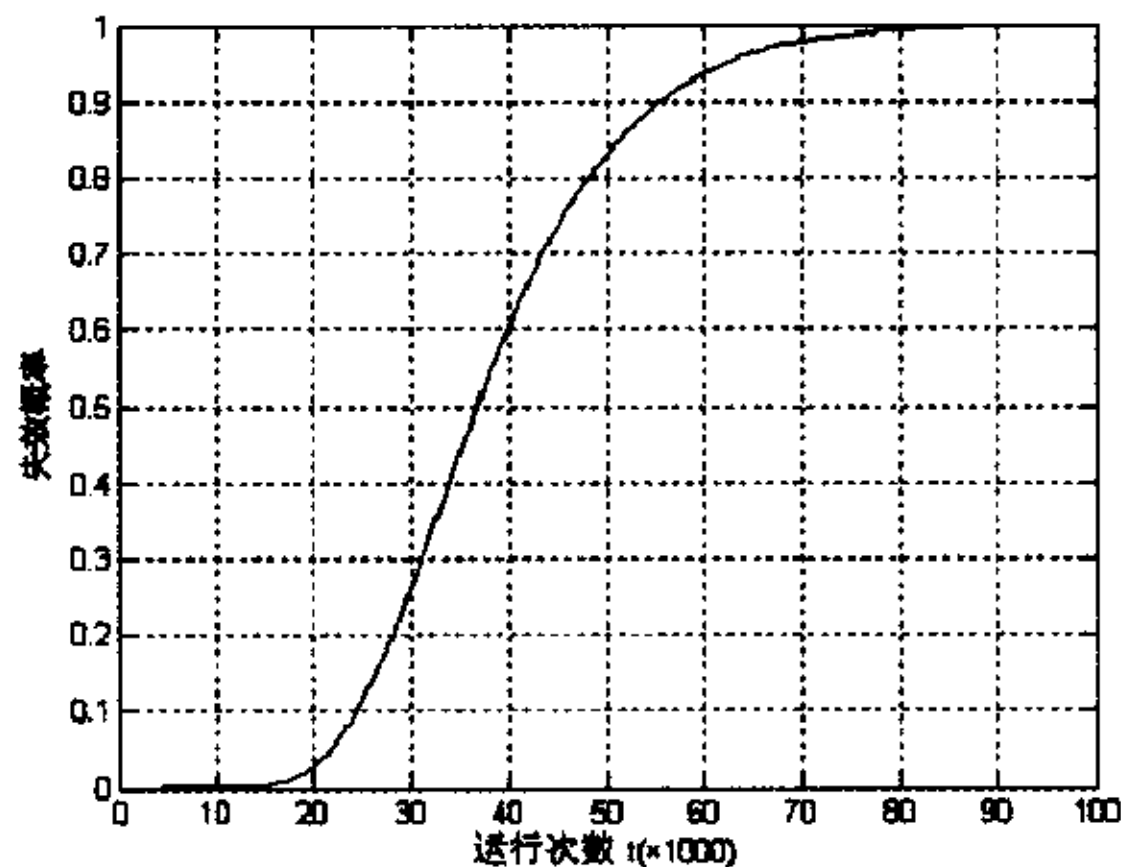


图4 失效概率曲线

该电子产品运行至20000次时可靠度为 $R(20000) = 1 - F(20000) = 0.9724$.

四. 结束语

由于费用与时间等约束, 很难用基于失效数据分析的传统可靠性方法进行高可靠性、长寿命产品的可靠性预计与评估, 加速退化试验技术则提供了解决该问题的一个途径, 在无法获得产品的失效数据时, 利用加速退化数据仍可对产品进行可靠性分析。针对目前基于加速退化数据进行可靠性分析的研究现状, 本文研究了基于加速退化试验数据的可靠性评估问题, 给出了加速退化方程和加速退化因子的一般定义, 结合某电子产品的加速退化失效问题, 研究了基于加速退化数据的可靠性统计推断问题。在工程问题中使用该技术可以大量的节约使用时间和费用。◆

参考文献:

- [1] Nair V.N., Discussion of 'Estimation of Reliability in Field Performance Studies' by J.D. Kalbfleisch and J.F. Lawless, Technometrics, 1988, 30, 379-383.
- [2] 姚增起. 系统退化和系统可靠性研究[C]. 博士学位论文, 中国科学院自动化研究所, 1988.

[3] Nelson W., Accelerated Testing: Statistical Models, Test Plans, and Data Analysis, John Wiley & Sons, New York, 1990.

[4] Meeker W. Q., Escobar L. A., Statistical Methods for Reliability Data, John Wiley & Sons, 1998.

[5] Lu C.J., Meeker W.Q., Using degradation measures to estimate a time-to-failure distribution, Technometrics, 1993, 35(2), 161-174.

[6] Crk V., Reliability assessment from degradation data, Proc. Annual Reliability and Maintainability Symposium, 2000.

[7] 庄东辰. 退化失效模型及其统计分析[C], 博士学位论文, 华东师范大学, 1994.

[8] Nelson W., Analysis of performance degradation data from accelerated tests, IEEE Trans. On Rel., 1981, 30(2):149-155.

[9] Wang W.D., Dan D.D., Reliability Quantification of Induction Motors-Accelerated Degradation Testing Approach, Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium, 2002, 325-331.

[10] 盐见弘(杨家铨等译)著. 失效物理基础[M]. 北京: 科学出版社, 1982.

[11] 茆诗松主编. 统计手册[M]. 北京: 科学出版社, 2003, 1月, 第一版.

上接35页

轨卫星的轨道高度正好处在范·阿伦辐射带的内辐射带, 因此受到的辐射影响很严重。

不同轨道上的粒子辐射总剂量可以根据轨道参数和NRL的CREME模型计算得到, 为简单起见, 我们根据文献[7]的测试数据, 设定粒子平均辐射剂量在 $10^3/\text{cm}^2\cdot\text{s}$ 量级, 那么根据单参数Bendel模型计算出的器件每天平均SER如下图所示:

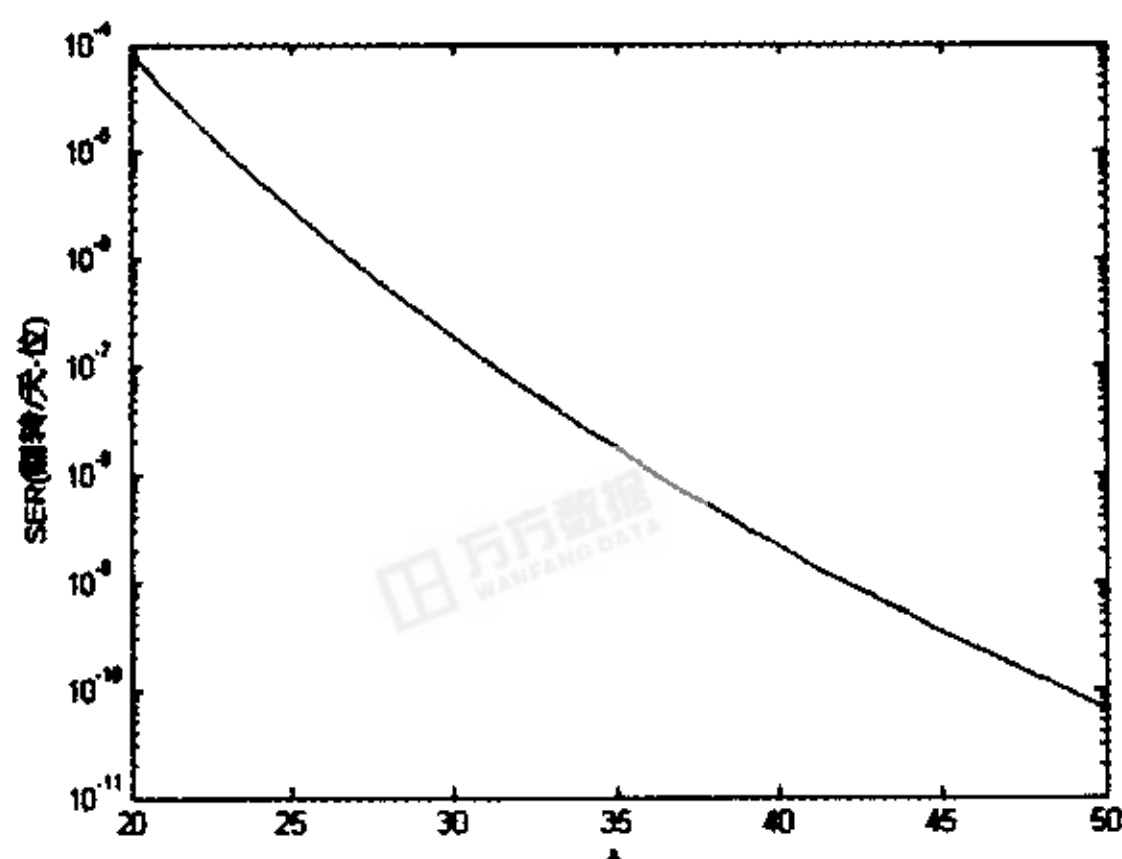


图2 不同A值器件SER

5. 结论

如果对应图2所示的特征值, 那么一个64Mbit的SRAM每天的SEU翻转数量在0.01到几千之间。可以看出, SEU的发生概率不大, 但这些错误足以对卫星或航天器构成致命的威胁, 因此在一般的航天器上都会有防辐射措施和EDAC设备。◆

参考文献:

- [1] 王长河, 空间辐射效应对微电子器件可靠性的影响及对策[J], 电子产品可靠性与环境试验, 1998年(3).
- [2] Sarlese, Justin A., "Development of a semi-empirical model for modern DRAMs", USNA Trident Scholar project

report, No.227 (2000)

[3] W.L. Bendel and E.L. Petersen, "Proton Upsets in Orbit", IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-30, 4481, (1983).

[4] W.L. Bendel and E.L. Petersen, "Predicting Single Event Upsets in the Earth's Proton belts", IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-31, 1201, (1984).

[5] W.J. Stapor, J.P. Meyers, J.B. Langworthy and E.L. Petersen "Two Parameter Bendel Model Calculations for Predictiong Proton Induced Upsets", IEEE Tran, Nucl. Sci., Vol. 37, NO. 6 pp. 1966-1972, December 1990.

[6] Philippe Calvel, Catherine Barillot, Pierre Lamothe, "An Empirical Model for Predicting Proton Induced Upset", IEEE, Tran Nucl Sci, Vol 43, No. 6 December 1996.

[7] Leonard Adams, Reno Harboe-Sorenson and Eamon Daly, "Proton Induced Upsets in the Low Altitude Polar Orbit", IEEE Tran, Nucl Sci, Vol. 36, No. 6, Dec 1989.