

doi: 10.7690/bgzd.2015.12.003

加速退化试验技术及其在加速度计中的应用

刘彤, 李华府

(中国空空导弹研究院第十六研究所, 河南 洛阳 471009)

摘要: 为满足长寿命、高可靠性产品的寿命和可靠性验证需求, 从工程实践角度探讨了部件级产品加速退化试验的一般方法, 并应用于加速度计的寿命和可靠性评估。首先探讨了加速退化试验的一般程序和注意事项; 其次, 通过在加速度计上开展加速退化试验具体说明了加速退化试验的实施过程; 最后, 在获取性能参数的退化数据基础上, 确定性能退化模型。结果表明, 该方法能实现加速度计的寿命和可靠性评估。根据试验及评估结果, 给出改进设计的建议。

关键词: 加速退化试验; 加速度计; 寿命; 可靠性

中图分类号: TJ410.6 **文献标志码:** A

Application of Accelerated Degradation Testing Technology in Accelerometer

Liu Tong, Li Huafu

(No. 16 Institution of China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China)

Abstract: To meet the life and reliability verification requirement of long-life product over high reliability, a general method of accelerated degradation testing (ADT) applied on assembly is proposed under the consideration of engineering practice in this paper, meanwhile it is applied for the life and reliability evaluation of accelerometer. First, the general program and some matters need attention of ADT are introduced. Then, the procedure of ADT is presented with its application on an accelerometer. Finally, life and reliability evaluation of the accelerometer is achieved on the performance degradation data and model. Result shows the method can Realize evaluation for accelerometer life and reliability. Put forwards improvement design suggestion according to test and evaluation result.

Keywords: accelerated degradation testing(ADT); accelerometer; life; reliability

0 引言

长期以来, 作为产品的寿命和可靠性要求, 一般采取寿命试验(工作或非工作状态下)、抽样鉴定、外场试验等方法进行评估, 但评估结果是在耗费较大的人力、物力、财力条件下取得的。另一方面, 随着技术进步使得航空、航天等领域内的长寿命、高可靠性的产品所占比重越来越大, 这类产品的寿命和可靠性要求的验证问题愈来愈突出。

当产品工作或贮存时, 因各种环境应力作用会导致其某种性能参数发生不可逆转的变化, 以至于无法达到正常状态。我们可以从这种随时间逐步退化的数据中发现其退化的规律性, 了解其寿命和可靠性水平。加速退化试验是在失效机理不变的前提下, 通过试验手段提高应力水平来加速产品性能退化进程, 收集产品在各个应力水平下的性能退化数据, 按照某种加速模型(寿命特征和应力之间的关系)来估计产品在正常应力下的寿命和可靠性的试验技术和方法^[1-2], 从而可以解决常规寿命试验存在的试验周期长、费用高的问题。

近年来, 国内外对加速退化试验的研究主要集中在元器件、材料级产品上, 如发光二极管、薄膜电阻、逻辑集成芯片、碳纤维等, 但对于部件级产品尚缺少工程上可行的一般试验方法。

加速度计是惯导系统中的重要部件, 广泛用于各类火箭、飞机、舰船等运载体, 具有典型的长寿命、高可靠性特点。为了在交付前就能够了解其寿命与可靠性水平, 笔者对加速退化试验的一般程序开展研究, 并对加速度计开展加速退化试验, 根据加速度计在高应力下的性能退化数据来外推评估其在正常使用条件下的寿命与可靠性水平。

1 加速退化试验

1.1 加速退化试验一般程序

加速退化试验一般应包括 3 个阶段: 试验方案设计阶段、试验实施阶段、数据处理及分析评估阶段。在各个阶段均需要注意有关影响试验实施和数据获取的各种因素, 以较为准确地估计产品寿命和可靠性^[3]。加速退化试验一般程序见图 1。

收稿日期: 2015-07-11; 修回日期: 2015-09-08

作者简介: 刘彤(1972—), 男, 河南人, 硕士, 高级工程师, 从事装备可靠性系统工程研究。

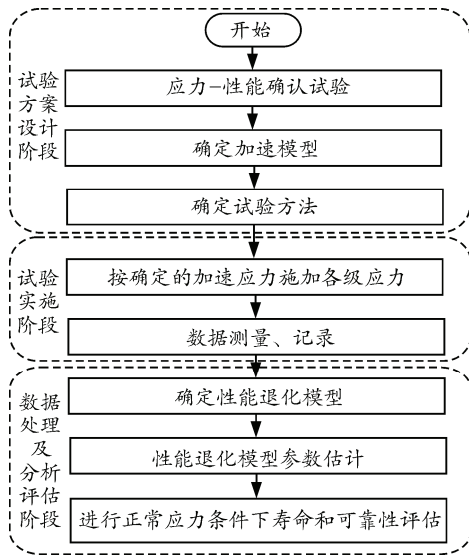


图 1 加速退化试验一般程序

1.2 性能退化参数及敏感应力分析

产品所具有的性能参数越多，将为试验实施带来的工作量越大，故应从产品寿命剖面中影响寿命和可靠性的关键性能参数入手来设计加速退化试验。确定性能参数的敏感应力是判断性能参数是否具有退化特性的前提。确定的依据主要是：

1) 环境剖面分析。

对产品在实际的贮存、运输和使用过程中的环境剖面进行分析，初步确定影响其性能参数退化的主要应力类型和影响程度。

2) 性能退化机理分析。

对上述环境剖面中产品性能退化机理分析，初步确定影响产品性能退化的各种因素，定性分析各种因素与环境应力之间的关系。

目前工程上常用的 2 种应力类型为温度和振动。研究表明它们是影响产品性能退化的主要环境应力。

值得注意的是，该性能参数还应该能够通过测试设备进行测试，测试设备最好具有自动在线测试的能力。

1.3 确定加速模型

在前述分析的基础上，参考可靠性强化试验中的步进应力施加方法，进一步确认产品是否具有退化特性，同时确定产品的加速应力和应力工作极限，为后续的试验方法提供依据。

加速模型反映了寿命特征与应力水平的关系。加速模型在通常情况下是一个非线性曲线，但是通过对退化数据和应力水平进行适当的数学变换(如

对数变换、倒数变换等)将其转换为线性模型。通过加速退化试验数据的分析，确定加速模型中的参数，然后再由加速模型对正常应力水平下的特征量做出推断。

工程上常用的加速模型^[4-5]有：

1) 阿伦尼斯(Arrhenius)模型。

产品失效从根本上讲都是基本的物理/化学过程，而温度对于许多物理/化学过程都是一个重要因素，因此在加速退化试验中温度常常被用作加速应力，用来加速腐蚀、电迁移、绝缘破坏等退化过程。19 世纪 Arrhenius 研究了温度激发类化学过程，在大量数据的基础上提出了 Arrhenius 加速模型：

$$\xi = Ae^{E/kT} \quad (1)$$

式中： ξ 表示退化量的某特征值或退化量随机过程的某参数； A 为常数； E 代表退化机理的激活能； k 表示波尔兹曼常数，等于 8.617×10^{-5} eV/K； T 为绝对温度。

Arrhenius 模型表明， ξ 随着温度的上升按指数函数规律下降。Arrhenius 模型一般适用于对温度较为敏感的电子产品，特别是在加速贮存寿命试验中得到了比较广泛的应用。

2) 逆幂律模型。

在加速退化试验中，除了温度应力以外，机械应力和电应力也可以作为加速应力。物理上的许多试验数据证实，产品在机械应力与电应力作用下的退化特征量与应力的关系常常满足逆幂律模型：

$$\xi = AS^{-n} \quad (2)$$

式中： ξ 是退化量的某特征值或退化量随机过程的某参数； A 和 n 为常数； S 表示应力水平。

逆幂律模型表明，产品的退化特征量是应力的负次幂函数。逆幂律模型适用于应力模型失效机理，如机械疲劳、机械磨损、电压击穿、绝缘击穿等失效，适用于机械产品和电工产品。

3) 艾林(Eyring)模型。

对于除温度应力以外还包含其他应力的情况，广义艾林模型描述了 2 种不同类型的应力(其中一种是温度)同时作用时的加速模型。此时，可得到表达式如下：

$$\xi = \frac{A}{T} e^{B/kT} \exp[S(C + \frac{D}{kT})] \quad (3)$$

式中： A 、 B 、 C 、 D 是待定常数； k 表示波尔兹曼常数； T 为绝对温度； S 表示温度以外的其他应力。

1.4 应力水平选择

加速退化试验的应力水平可按以下原则进行：

1) 应力水平不应该超过产品的工作极限。

当应力条件超过产品破坏极限时，由于产品已经遭到破坏而不再工作，就谈不上性能参数的退化。若当产品在应力条件超过其工作极限时，其退化失效机理可能已经改变，所测得的数据将对评估可信度造成影响。

2) 初始应力水平接近于正常条件。

为了避免由于初始温度过高而对产品产生温度冲击，引入新的失效机理，应该尽量使初始应力水平接近于正常条件。但由于试验的时间限制，需要在相对较短的时间内确认产品的性能退化趋势，因此，初始应力水平的选择应兼顾两者后再确定。

3) 应力水平数应在 3~5 个之间。

应力水平数太少时，高应力水平若较高，接近工作极限，那么会导致数据外推可信度的下降；若高应力水平较低，就不能有效缩短试验时间。而当应力水平数较多时，数据处理工作量就会加大；且总试验时间确定时，则每个应力水平的保持时间就会减少，产品难以出现足够的退化。

4) 应力步长随应力加大而减小。

应力步长若为常数，则会造成低应力水平偏多。而产品的性能参数通常在低应力水平下变化较慢，增加试验时间和费用，而在高应力下的变化规律较为明显。

1.5 数据处理及分析评估

在根据加速退化数据进行统计分析时，需要以下基本假设：

假设 1 产品的性能退化过程具有单调性，即性能发生的退化不可逆；

假设 2 性能随机变量在不同应力水平下均服从同一参数族分布，即每个应力水平下产品的失效机理不变。

针对步进应力加速退化试验而言，按照 Nelson 提出的有关累积损伤论述^[6]，还需要增加下面假设：

假设 3 产品的残余寿命仅依赖于当时已累积失效部分和当时应力水平，而与累积方式无关。

工程上对加速退化数据进行统计分析可采用多种性能退化模型。例如，针对性能参数随时间变化的趋势建模；采用随机过程对性能退化过程建模等。通过加速模型描述模型参数与应力水平的关系，进而对寿命和可靠性水平进行评估。

另外，在性能退化模型中，一般要预先设置失

效阈值，该值可以用性能退化到初值的某个百分比，如 1%、5% 等。

2 加速度计加速退化试验

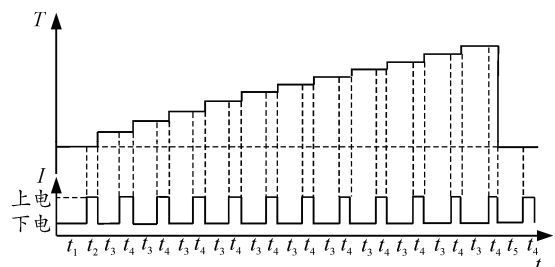
2.1 加速度计的性能退化参数和敏感应力分析

加速度计是为惯导平台提供运动载体的加速度信息，主要由传感器组件、伺服电路组件、力矩器组件和密封组件 4 部分组成。通过加速度计的功能和可靠性分析，在其寿命期内反映寿命与可靠性的关键性能参数是标度因数。而磁性能组件对该指标的退化具有主要影响。通过对磁性能组件故障原因分析，磁性能组件性能退化的一个重要原因是温度补偿不够。一般温度变化对产品的内部结构参数、力敏元件的应力分布状态和磁路工作点等环节都会产生影响。这种温度特性如不加以补偿会使得输出产生较大的漂移。磁回路由提供磁能量的磁钢和起导磁作用的轭铁、磁极帽形成，每种材料的膨胀系数不同。在温度条件发生变化时，磁路的结构参数将随之产生变化，导致磁路工作点、工作磁场分布状态、上下磁路的对称性等产生变化，其结果就是使输出的精度降低。通过以上分析可以看出，磁性能组件的敏感环境应力应为温度应力。因此将加速度计的敏感环境应力确定为温度应力。

2.2 加速退化试验设计与结果分析

2.2.1 加速退化试验设计

为进一步确认加速度计在温度应力下的退化特性，对加速度计从正常温度到工作极限温度进行了温度-性能确认试验，从 20℃ 开始，最高进行到 100℃，且在该温度下没有发生故障，试验剖面如图 2 所示。



注： t_1 是室温到 20℃ 的时间； t_2 是加速度计在 20℃ 时的性能测试时间； t_3 是温度稳定时间； t_4 是加速度计性能测试时间； t_5 是高温恢复至 20℃ 的稳定时间。

图 2 温度-性能确认试验剖面图

参考加速度计的工作温度范围，确定步进应力加速退化试验的最低应力水平为 65℃，在 65~100℃ 之间共选择 3 个应力水平作为加速退化试验的应力水平，分别为 65、75 和 85℃。

根据加速度计的温度特性分析及试验结果，确定温度作为加速应力；因此选择加速模型为 Arrhenius 模型，即：

$$d(T) = A \cdot \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right) \quad (4)$$

其中： A 为常数； k 为波尔兹曼常数； E_a 为激活能； T 为绝对温度。

结合工程实际，共有 9 只样本投入试验，采用自动测试设备对样本的标度因数指标进行测试。

为缩短试验周期，采用步进应力施加方法，每个应力水平的试验时间分别为 1 300、800 和 400 h。试验剖面如图 3 所示。

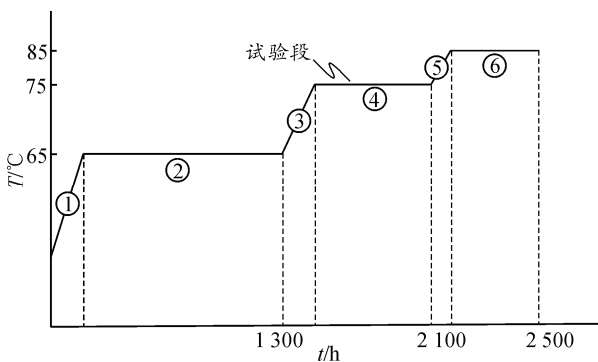


图 3 试验剖面

2.2.2 寿命和可靠性评估

结合加速度计的温度特性，假设其性能退化过程服从漂移布朗运动^[7]，性能退化过程建模如下：

$$Y(t) = \sigma B(t) + d(s) \cdot t + y_0 \quad (5)$$

其中： $Y(t)$ 为产品性能； y_0 是漂移布朗运动的起始点，产品性能在初始时刻 t_0 的初始值； $B(t)$ 为标准布朗运动， $B(t) \sim N(0, t)$ ； $d(s)$ 为漂移系数，是仅与应力相关的函数； σ 为扩散系数，刻画了产品生产过程中不一致性与不稳定性、性能测量设备的测量能力及测量误差以及试验过程中外部噪声等因素对产品性能的影响。通常这些因素不会随时间和应力条件的改变而改变，因此该系数为常数。

对于漂移布朗运动 $Y(t)$ 而言，若令 $T_a = \inf\{t : t > 0, Y(t) = a\}$ ， T_a 表示首次穿越 a 的时间，则称 T_a 为首穿时或首达时 (first passage time)，相应的首穿时分布为逆高斯分布，即式 (6)，且可作为评估模型。

$$R(t) = \Phi\left[\frac{a - y_0 - d(s)t}{\sigma\sqrt{t}}\right] - \exp\left(\frac{2d(s)(a - y_0)}{\sigma^2}\right) \Phi\left[-\frac{a - y_0 + d(s)t}{\sigma\sqrt{t}}\right] \quad (6)$$

根据加速度计的测量数据得到不同应力水平下的退化率 $d(s)$ ，按加速模型确定退化率和应力的关系如下式：

$$\ln d(s) = \alpha + \beta/T \quad (7)$$

式中： $\alpha = \ln A$ ； $\beta = E_a/k$ 。

通过拟合分析，得到 α 和 β 的估计值分别为 15.578 2、 $0.112 0 \times 10^5$ 。 σ 通过极大似然估计^[8]得到，为 $4.715 9 \times 10^{-6}$ 。取失效阈值为性能初始值的 1% 时，将 α 、 β 、 σ 的估计值代入式 (6) 和式 (7)，可得到加速度计在正常温度 (20 °C) 下，寿命到达 16 a 时的可靠度为 0.902 5。

3 结束语

通过合理的加速退化试验设计，笔者不仅能从中获得足够多的数据来评估产品的寿命和可靠性，而且还能有效节省试验成本、缩短试验时间。值得注意的是，评估结果会受到样本退化特性、敏感应力分析、加速模型等因素的影响。在加速度计的加速退化试验中，笔者针对可能影响加速度计性能参数 (标度因数) 退化的各个部分如磁性能组件、粘接磁钢模块及底座的环氧胶粘剂的退化性能进行了监测，发现它们自身的退化性能并不显著；因此，还需要对影响加速度计标度因数性能退化的关键零部件或材料进行深入研究，以改进设计，从而提高其寿命和可靠性水平。

参考文献：

- [1] Nelson W. Accelerated life testing-step-stress models and data analysis[J]. IEEE Transactions of reliability, 1980, R29(2): 103-108.
- [2] Meeker W Q, Escobar L A. Statistical Methods for Reliability Data[M]. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1998.
- [3] 何国伟. 可靠性试验技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995: 10-15.
- [4] 龚庆祥, 赵宇, 顾长鸿. 型号可靠性工程手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 463-481.
- [5] 李晓阳, 姜同敏. 加速寿命试验中多应力加速模型综述[J]. 系统工程与电子技术, 2007(5): 828-831.
- [6] Nelson W. Accelerated Testing: Statistical Models, Test Plans, and Data Analyses[M]. John Wiley & Sons, New York, 1990: 377-424.
- [7] 姜同敏. 可靠性与寿命试验[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012: 346-355.
- [8] 李晓阳, 姜同敏. 基于加速退化模型的卫星组件寿命与可靠性评估方法[J]. 航空学报, 2007, 28(8): 100-103.