

加速寿命试验

一般执行寿命试验之目的在评估产品于既定环境下之使用寿命，耗时较久，且须投入大量的金钱，而产品可靠度信息又不能实时获得并加以改善，导致失去许多"商机"与"竞争力"。因此，如何在实验室中以加速寿命试验(Accelerated Life Testing; ALT)的方法，在可接受的试验时间内评估产品的使用寿命，便成为整体可靠度试验工作中相当重要的一环，亦为可靠度试验中最具挑战性的课题。

基本上，加速寿命试验是在物理与时间上，加速产品的劣化肇因，以较短的时间试验，并据以推定产品在正常使用状态的寿命或失效率。如果产品的劣化机构单纯，拟订加速寿命试验计划较容易。但实际产品失效往往牵涉到很多失效机构，即使欲同时加速，加速程度也因失效机构而异，可能发生迥异于实际操作上的失效模式。因此，加速寿命试验之基本条件是不能破坏原有特性，要尽量选择失效机构不变化的试验条件，或失效机构容易单纯化的试验条件，使加速寿命试验结果之适用范围明确化。

例如某信息设备的输入电压限制为 100~130V，若规划以 200V 为输入，当然就破坏了原有的设计特性。

一般说来，加速寿命试验考虑的三个要素为「环境应力」、「试验样本数」及「试验时间」。假如产品既复杂又昂贵，则样本数将较少，相对的须增加试验时间或环境应力，以加速其试验；反之如果产品造价较便宜，且数量多，则欲缩短试验时间的情况下，可考虑增加样本数或环境应力。惟如前面所叙述，加速寿命试验下的失效模式，必须与正常操作环境下之寿命试验相同，其试验结果才有意义。

谈加速寿命试验，最重要的是如何掌握其加速因子(Accelerated Factor)。假使相同产品，做二种不同应力(加速)条件的试验，其结果可得二个不同的特征寿命 η_1 (设为低应力试验条件) 及 η_2 (为高应力条件)，则 η_1 / η_2 即为加速因子(高、低应力间相对的加速程度)，图 6.20 即为此种加速观念的示意图。在相同产品老化程度下，两种试验的时间显然不同，由图 6.20 所得 T_1/T_2 值即为加速因子。

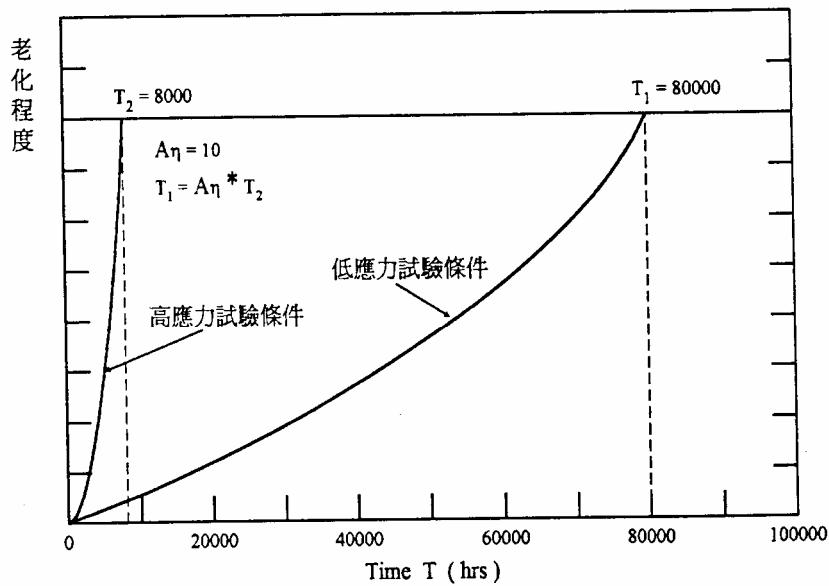


圖 6.20 加速壽命試驗之觀念示意圖

根据加速寿命试验的结果，方可预估第三(或更多)种应力试验条件的特征寿命(或)，其相对应问的加速因子(如/等)。假使加速(温度、电压或湿度等)模式可由数学式表示，则预测(未经试验下)特定应力(试验条件)的或相对应的加速因子，将不曾造成困难。以一般电子、信息业而言，零件类的可靠度模式及加速模式几乎部可以从美军规范或相关文献查得，甚或可自行试验分析，获得其数学经验公式。但由各种不同零件组合 组件类，其失效模式较为复杂，因此只要是新的产品我必须至少做二种(高及低应力条件)试验，做为尔后寿命预测之参考及相关参数之参考数据。

若温度(外加应力)是产品惟一的加速因素，则采可采用 Arrhenius 模式;另反乘幂法则式 (Inverse Power Law Model)及 Eyring Model 适用于金属和非金属材料、电容、轴承、电子装备等之加速寿命试验模式;复合模式(Combination model)则可适用于电子产品之加速寿命试验;此外，亦可如 Martin Marietta 公司由其本身所累积之经验，建立某些零组件所适用的加速寿命试验模式(Kimball,1980)-

加速寿命试验之分类

如前所述，加速寿命试验是在操作频率方面或在理化反应方面加速试件之劣化条件，以较短时间推定产品正常使用状态之失效率或寿命的试验方法。依其实施的方法可分为应力加速、时间加速及分析加速三大类型，兹分述如下：

(1)应力加速寿命试验:此法系加重工作应力或环境应力，短时间内造成强制劣化效果的加速寿命试验方法，所施加之应力通常大小一定。但亦有随时间变化的步进应力(Step Stress)试验法。加速应力试验在施加应力种类、大小及施加方式等方面均须有适当考虑选择。所选择应力种类须有效造成强制劣化效应，而其可施加应力之大小应受「所造成失效模式与实际操作时发生者相同」的约束。施加方式，须使应力之传递、分布及作用方式与实际操作情况相同。凡此种种，在试验规划设计时皆需要注意考虑。

(2)时间加速寿命试验(亦称反复加速寿命试验):此法系增加产品操作之反复次数或形成连续

动作，以造成加速效应的方法，属于狭义的加速寿命试验。此法适用于诸如自动电话交换机选择开关等，工作中以开机关机为必要动作且为造成失效主要原因之机械。

(3)分析加速寿命试验:此法系应用劣化观测及数据分析分析技巧,加速判定失效率或寿命状况的方法。简单一点的说,分析加速寿命试验便是在产品之造价相当昂贵时,则可斟酌采用增加试验时间,减少取样的试验方法;反之,若产品产量多且造价低廉,则可考虑增加样本,并相对的减少试验时间的一种加速寿命试验。

以下将针对应力加速寿命试验予以介绍,同时亦持重点锁定于电子产品之应力加速寿命试验的规划与评估。

加速寿命试验的相关问题

理论上,若加速寿命与实用寿命的失效模式相同,即可运用加速寿命试验。但实际上,有时失效模式相同,失效机构(Mechanism)却不同,或即使失效机构亦相同,但失效判定条件或使用条件变动的話,加速性就变化。在长期的研发改进过程中,产品的设计或制造方法都可能发生变化,顾客的使用条件方可能发生变化;或是以规定的技术方法所生产的产品,也因存在无法控制的因素影响,造成失效机构的改变,这些都可能造成无法利用加速寿命试验。

例如,电子管的寿命满足 Arrhenius 的关系式,所以可提高阴极温度,实施加速寿命试验。例如,电视机用布朗管若使阴极温度成为额定值的 100%,可实施加速因子为 2.2 倍至 3 倍的加速寿命试验。但不论是阴极温度低于额定,或不从阴极取电流而使用电子管时,都会显著减短寿命。两者之失效模式都是电子放射不良,但其间的差异在于失效机构不同。电子管常因阴极活性物质的减少而使电子放射特性劣化,但阴极温度减低的话,管内不纯气体的作用亦会使电子放射特性劣化;若不取电流而动作的话,阴极内部生成的中间层化合物电阻增大,亦使电子放射特性劣化,所以即使判定寿命的失效模式相同,失效机构也不同。故电子管须检讨实际使用时阴极温度的偏差、间歇动作等条件,才能决定实施加速寿命试验之方法。

除了以上所提的问题外,在规划加速寿命试验时须综合考虑下列问题,才能选定加速寿命试验的条件,以决定其适用的范围:

- (1)施加应力之大小不同可能形成不同的失效模式,在此种情形下,应力加速法之使用受到限制。
- (2)失效发生时间与施加应力强度之间,可能因应力大小之不同或因机械操作条件不同而有不同的关系,放在加速寿命试验规划之初,就应该注意到此种应力加速适用范围的问题。
- (3)可在若干不同的试验方法及不同的失效分析基准之中,选用加速因子较大的方法,以较短试验时间评估寿命的效用。
- (4)产品在实地使用状况下,应力的变动大,失效发生的条件方可因使用者不同而异;或即使是反应机构相同的失效,分散亦颇不均匀,因此利用实验数据推定实际使用寿命时,应尽量指定累积失效率加以推定,以避免因数据不充足造成错误的分析。

反应速度论与反应速度模式

由于实际之需要,科学家早就注意研究寿命与应力之关系,其成果即多应用于加速寿命试验,其中以经验及实验求得者居多。在理论推导的寿命与应力关系中,以"反应速度论"所推导者最具代表性。依据反应速度理论,对象发生失效(或称故障)系基体物质因蒸发、扩散、

氧化、吸着、腐蚀、离子转移、再结晶等物理与化学反应而逐步劣化，终至超越界限即发生失效。

假设 $\mu(t)$ 代表组件或材料在时间为 t 时之应力参数(如电阻、电流、温度、强度、干扰等)。则 $\mu(t)$ 与应力之间存有下列关系

$$f(\mu) = K_r t \quad (1)$$

式中 K_r 为反应速度常数，而 $f(\mu)$ 仅为 μ 的函数。对于劣化反应之反应速度不随时间变动者(例如氧化、腐蚀)，存在 $\mu - \mu_0 = K_r t$ 的关系，其中 μ_0 为起始值；对反应速度与基体现况成正比者(例如蒸发)，则有 $\mu / \mu_0 = K_r t$ 的关系。

若将劣化至失效发生之时间称为产品寿命(η)，而当时对应的特性参数值为 μ_F ，则有 $f(\mu_F) = K_r \eta$ (2)

由上式可知，若能了解 K_r 与应力的关系，即可求得产品寿命与应力的关系。

定应力加速寿命试验

此法系加重工作应力或环境应力，短时间内造成强制劣化效果的加速寿命试验方法，所施加之应力通常大小一定。但亦有随时间变化的步造应力试验法。加速应力试验在施加应力种类、大小及施加方式等方面均须有适当考虑选择。若应力水平保持固定之寿命试验称为定应力寿命试验(Constant Stress Accelerated Test; CSAT)，以下将介绍几种常见的定应力加速寿命试验模式(Kececioglu and Jacks, 1983)。

阿氏(Arrhenius)加速寿命试验模式

若加速寿命试验所考虑的环境应力为温度，且失效时间符合指数分布，则可采用Arrhenius模式作为加速寿命试验之分析模式。在Arrhenius之反应速度论模式中，反应速度常数 K_r 与温度 T (以绝对温度。K表示)间之关系为

$$K_r = A \cdot e^{-\frac{E}{KT}} \quad (3)$$

或

$$\ln K_r = \ln A - \frac{E}{KT} \quad (4)$$

式中 K 为Boltzmann常数($=8.623 \times 10^{-5} \text{ eV/}^\circ\text{K}$)， E 为活化能， A 为比例常数。将(4)式代入(2)，可建立寿命 η 与温度 T 的关系为

$$\ln \eta = \ln [f(\mu_F)] - \ln K_r = \ln [f(\mu_F)] - \ln A + \frac{E}{KT}$$

由于 $\ln [f(\mu_F)] - \ln A = \ln C$ 为一常数，故上式可简化为

$$\ln \eta = \ln C + \left(\frac{E}{KT}\right) \left(\frac{1}{T}\right) \quad (5a)$$

或

$$\eta = C \cdot e^{\frac{E}{KT}} \quad (5b)$$

此即Arrhenius加速寿命试验模式。一般而言，主动电子零件完全适合本模式；而电子、信息类成品仍然可适用本模式，理由是成品类的失效模式系由大部份主动电子零件所构成，因此，

阿氏模式为一般电子、信息业(零件或成品)所认同。已有实验证明电子管的阴极温度, 半导体的接合温度、电阻或电容器的表面温度、马达的绝缘材料温度等与寿命之间亦存有Arrhenius之关系, 故此类产品的加速寿命试验均可应用阿氏模式。

假设产品在正常操作状态之寿命及温度分别为 η_n 及 T_n ;加速寿命试验状态之寿命及温度分别为 η_a 及 T_a , 则Arrhenius模式成立时之加速因子(A_η)为

$$A_\eta = \frac{\eta_n}{\eta_a} = e^{\left(\frac{E}{K}\right)\left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T_a}\right)} \quad (6)$$

若假设失效率为(λ), 失效率加速因子(A_λ)则为

$$\ln \lambda = -\ln C - \frac{E}{KT} \quad (7)$$

$$A_\lambda = \frac{\lambda_a}{\lambda_n} = e^{\left(\frac{E}{K}\right)\left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T_a}\right)} \quad (8)$$

由(6)或(8)式可知, 只要知道两种试验条件下的温度(T_a 及 T_n), 即可获知加速试验之加速因子。但(6)式与(8)式系假设试件在两种不同温度下之活化能(E)相同所获得的结果, 故应用时两种试验温度差距不宜过大, 否则所预估之加速因子可信度将降低。一般电子产品在早天期失效之活化能约在 0.2~0.6eV之间, **正常有用期失效之活化能趋近于 1.0eV**, 而衰老期失效之活化能将大于 1.0eV。有关活化能之估算, 将在以后章节中加以介绍。

[范例]

取 7 件产品作 50°C 之加速寿命试验, 得知其失效时间分别为:3000、3450、5000、6500、7850、8000、8500 小时。若该产品正常的操作温度为 25°C, 则该产品执行 50°C 加速试验之加速因子, 以及正常操作下之平均寿命可依下列方式计算之。

该产品执行 50°C 加速试验之加速因子为(设活化能 $E=1.0\text{eV}$)

$$A_\eta = e^{\left(\frac{1.0}{8.623 \times 10^{-5}}\right)\left(\frac{1}{273+25} - \frac{1}{273+50}\right)} = 20$$

又该产品在 50°C 之平均寿命为

$$\eta_{50} = (3000+3450+5000+6500+7850+8000+8500)/7 = 6043 \text{ 小时}$$

故该产品正常操作下(25°C)之平均寿命为

$$\eta_{25} = 6043 \times 20 = 120860 \text{ 小时}$$

由本范例可知, 若活化能设定(假设)值差距过大, 预估之加速因子差异将更大。

因此建议最好做两种试验, 将其结果绘于加速机率纸上, 以预估第三种(或以上)操作温度之寿命较为准确。有关加速机率纸之应用将于下一范例中介绍。

[范例]

取某电子产品 10 件执行 150°C(不超过额定温度)之加速寿命试验, 其失效时间分别为:2750、3100、3400、3800、4100、4400、4700、5100、5700、6400 小时。若该产品正常的操作温度为 85°C, 则该产品在正常操作下之最短寿命为可估计如下。

由已知之失效时间数据得在 150°C 温度下之最短寿命为 2750 小时。又该产品在 150°C 下, 最短寿命之加速因子为(设活化能 $E=0.5\text{eV}$)

$$A_{\eta} = e^{\left(\frac{0.5}{8.623 \times 10^{-5}}\right) \left(\frac{1}{273+85} - \frac{1}{273+150}\right)} = 12$$

故该产品在正常操作下 85. C之最短寿命为

$$\eta_{85} = 3750 \times 12 = 33130 \text{ 小时}$$

本范例若欲估算产品在正常操作下平均寿命，则可在上述计算过程中，由平均寿命取代最短寿命即可。

利用Arrhenius加速模式亦可建立类似机率绘图分析之加速机率纸方便分析使用。加速机率纸之应用是根据(6.59)式所发展。图 6.21 系一温度加速机率纸，横(X)轴以寿命时间表示(因为每种试验之产品寿命累积失效率都是一样即 $F(\eta)=0.632$ ，换言之是在相同的老化程度作比较)，其刻度以 $\ln(\eta)$ 表示;纵(Y)表温度，以 $1/T\left(\frac{\ln\eta - \ln A_{\eta}}{E/K}\right)$ 刻度(但以摄氏温度 $^{\circ}\text{C}$)表示之，其中 A_{η} 及

E/F为预估值。

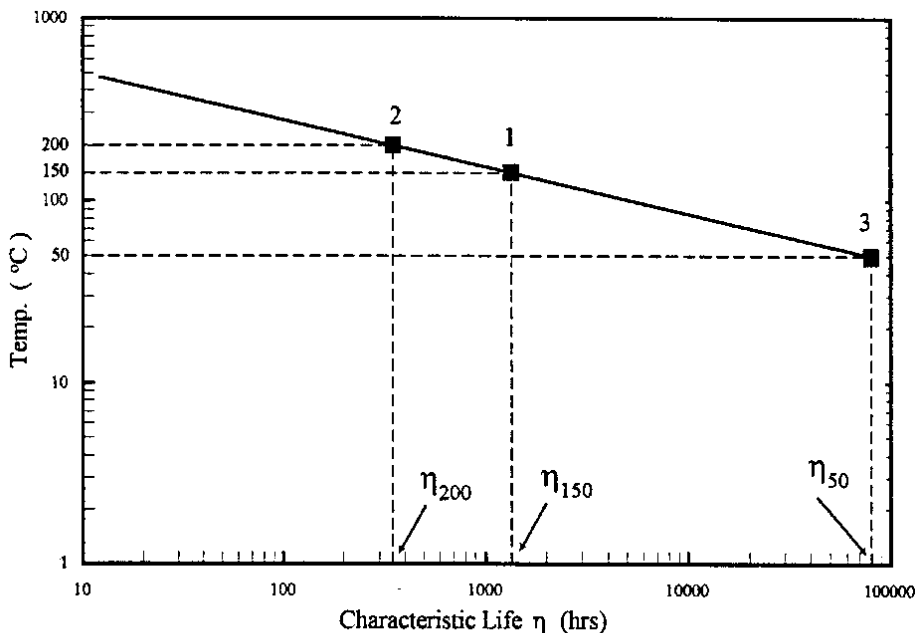


圖6.21 推算加速因子圖例

有关点绘加速机率纸的程序如下:

- (1)先做二种不同应力水平的试验，如 200 $^{\circ}\text{C}$ 及 150 $^{\circ}\text{C}$ ，正常湿度且正常电压。
- (2)将试验结果点绘于韦氏机率纸上，求得两种不同条件下的特征寿命如 η_{200} 及 η_{150} 。
- (3)将 η_{200} 及 η_{150} 值分别对应于"加速机率纸"的X轴，且于Y轴分别找出温度 200 $^{\circ}\text{C}$ 及 150 $^{\circ}\text{C}$ ，如图中之点「2」及「1」。
- (4)将点「2」及「1」连成一条直线，并上下直线延伸，此即为产品的温度加速线。
- (5)若欲求其它试验条件(如在 50 $^{\circ}\text{C}$)的待征寿命值，则很容易在线找出对应 η 值，如点「3」的 η_{50} 。
- (6)若欲求高应力和正常使用条件间之加速因子(如 200 $^{\circ}\text{C}$ 和 50 $^{\circ}\text{C}$ 下之加速因子)，则 $A_{\eta} = \eta_{50} / \eta_{200}$ 如图 6. 21 所示。
- (7)余此类推，吾人可获得不同条件之 η 及 A_{η} 值。

此处应特别注意以下两点:

(a)若加速条件已明显破坏产品的特性时, 此条件即不适用于上述情形。

(b)相同产品, 而外应力仅温度不同, 且二种试验皆在有效寿命期内时, 此两不同条件所点绘之韦氏线应相互平行, 否则表示试验过程中有重大外力偏差(例如温度控制不当, 电压源不当或测试条件不当等), 此时应重新试验, 或求其近似值。

[范例]

若分别执行 150℃ 及 75℃ 二种温度加速寿命试验, 点绘韦氏线(图 6.22)后得知

$$\ln \eta = \ln C + \frac{E}{K} - \frac{1}{T}$$

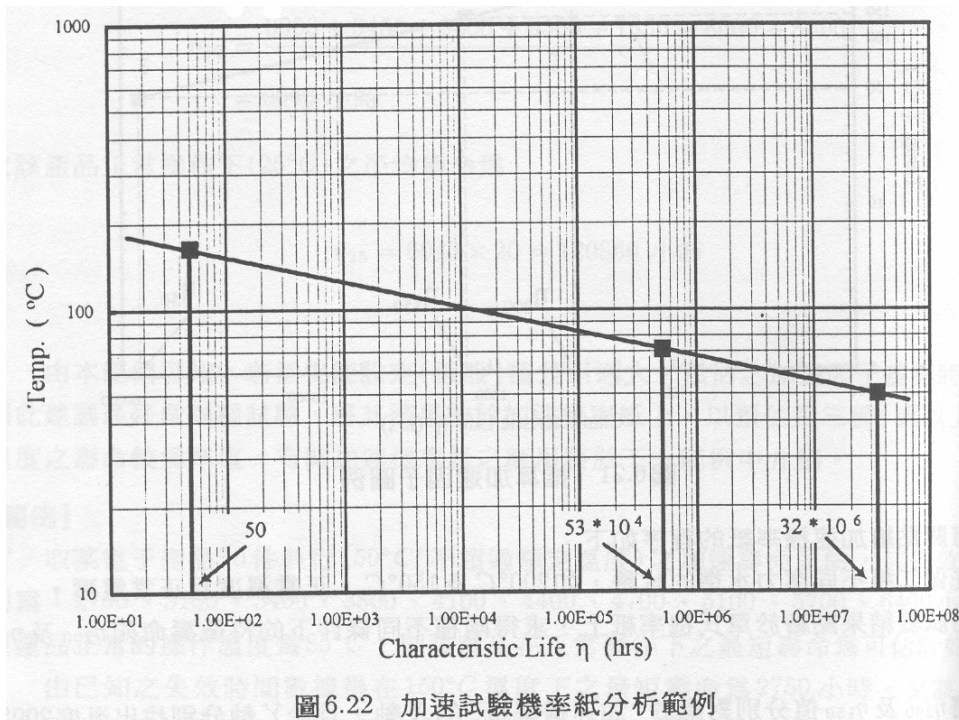


圖 6.22 加速試驗機率紙分析範例

$\eta_{150}=50$ 小时, $\beta = 1.5$

$\eta_{75}=530 \times 10^3$ 小时, $\beta = 0.6$

试分析

(1)150℃ 对 75℃ 之加速因子为若干?

(2)若此产品之正常作业温度为 50℃, 求在正常作业状态下该产品之特征寿命(此即为 MTBF)为若干?

(3)75℃ 对正常操作之加速因子为若干?

解:

(1)加速因子 $A_{\eta} = 530 \times 10^3 / 50 = 10.6 \times 10^3$ (倍)。

(2)由图 6.22 中点绘得 $\eta_{50} = 32 \times 10^6$ 小时。

(3)75℃ 对 50℃ 下之加速因子为

$$A_{\eta} = \eta_{50} / \eta_{75} = 32 \times 10^6 / 530 \times 10^3 = 60 \text{ (倍)}$$

由此例可知, 温度愈高, 加速程度愈快(大), 但并非直线的增加。