**基于Arrhenius Mode的产品寿命预估应用**

摘要：

 可靠性是衡量产品品质的关键特性，但如何衡量可靠性呢？MTBF就是将可靠性量化的最常见的方式之一，但如何简单有效的计算MTBF？Arrhenius Mode将试验方式、将结果如何转化为MTBF联系起来，但如何计算出来，如何由目标值来制定测试方案、测试数量，往往知之者甚少，本文从基础概念开始介绍，逐步引入相关概念与简单计算方式，再到示例各种Arrhenius Mode实用方式，并简单分析该模型的实用性与局限性。

关键词：Arrhenius、MTBF、激活能、加速因子、可靠性、卡方分布函数

一、故障率、MTBF、MTTR、MTTF

故障率：概括地说，产品故障少的就是可靠性高，产品的故障总数与寿命单位总数之比叫“故障率” （Failure rate），常用λ表示。例如正在运行中的100只硬盘，一年之内出了2次故障，则每个硬盘的故障率为 0.02次/年。

MTBF——全称是Mean Time Between Failure，即平均无故障工作时间，也叫做平均故障间隔时间。就是从新的产品在规定的工作环境条件下开始工作到出现第一个故障的时间的平均值。MTBF越长表示可靠性越高正确工作能力越强 。

MTTR——全称是Mean Time To Repair，即平均修复时间。是指可修复产品的平均修复时间，就是从出现故障到修复中间的这段时间。MTTR越短表示易恢复性越好。

MTTF——全称是Mean Time To Failure，即平均失效时间。系统平均能够正常运行多长时间，才发生一次故障。系统的可靠性越高，平均无故障时间越长。

可靠性是最初是确定一个系统在一个特定的运行时间内有效运行的概率的一个标准。可靠性的衡量需要系统在某段时间内保持正常的运行。

目前，使用最为广泛的一个衡量可靠性的参数是，MTTF(mean time to failure，平均失效前时间)，定义为随机变量、出错时间等的"期望值"。但是，MTTF经常被错误地理解为，"能保证的最短的生命周期"。MTTF的长短，通常与使用周期中的产品有关，其中不包括老化失效。

MTTR（Mean Time To Repair ， 平均恢复前时间），源自于IEC 61508中的平均维护时间（mean time to repair），目的是为了清楚界定术语中的时间的概念，MTTR是随机变量恢复时间得期望值。它包括确认失效发生所必需的时间，以及维护所需要的时间。MTTR也必须包含获得配件的时间，维修团队的响应时间，记录所有任务的时间，还有将设备重新投入使用的时间。

MTBF（Mean Time Between Failures ，平均故障间隔时间)定义为，失效或维护中所需要的平均时间，包括故障时间以及检测和维护设备的时间。对于一个简单的可维护的元件，MTBF = MTTF + MTTR。因为MTTR通常远小于MTTF，所以MTBF近似等于MTTF，通常由MTTF替代。MTBF用于可维护性和不可维护的系统。

二、故障率的简单应用

故障率的当产品的寿命服从指数分布时，其故障率的倒数 (1/ λ)就叫做平均故障间隔时间，即：MTBF=1/ λ。

指数分配的概率分配函数：$f\left(t\right)=1/θe^{-t/θ} $ $(t\geq 0)$

可靠性函数（不故障率）： $R\left(t\right)=e^{-t/θ}$

故障分配函数： $F\left(t\right)=1-e^{-t/θ}$

故障率函数： $λ\left(t\right)=\frac{f\left(t\right)}{R\left(t\right)}=1/θ$

其中：$θ$=平均值或MTBF

 $t$=使用期或保固期

通常，有部分人认为使用寿命等于保固期，其实这是一个误区，在单次故障下，使用寿命≈MTBF，即当MTBF等于保固期（$θ=t$）时，计算出不故障率$R\left(t\right)=e^{-t/θ}=e^{-1}$≈0.36=36%，也即故障率等于64%，这个故障率对于生产商来说，这是一个无法接受的指标。

举例：价格一个服务器硬盘的MTBF=1200000hrs（相当于137年），而保固期为5年，则该硬盘的平均年故障率及5年故障率为？

年均故障率λ=1/MTBF=1/137=0.7%，即一年内平均1000台硬盘会有7台发生故障。

5年故障率: $F\left(5\right)=1-e^{-5/137}=0.0358=3.58\%$

所以实际上MTBF一般多倍于保固期,而且根据以上方式可以一句MTBF推算保固期内的维护成本。

三、只考虑热加速因子的阿伦纽斯模型（Arrhenius Mode）

某一环境下，温度成为影响产品老化及使用寿命的绝对主要因素时，采用单纯考虑热加速因子效应而推导出的阿伦纽斯模型来描述测试，其预估到的结果会更接近真实值，模拟试验的效果会更好。此时，阿伦纽斯模型的表达式为：

 $AF=exp⁡[\frac{Ea}{k}×(\frac{1}{Tu}-\frac{1}{Tt})]$

式中：

    AF是加速因子；

Ea是析出故障的耗费能量，又称激活能，也成活化能。不同产品的激活能是不一样的。一般来说，激活能的值在0.3ev~1.2ev之间；

 K是玻尔兹曼常数，其值为8.617385×10-5；

    Tu是使用条件下(非加速状态下)的温度值。此处的温度值是绝对温度值，以K(开尔文)作单位；

Tt是测试条件下(加速状态下)的温度值。此处的温度值是绝对温度值，以K(开尔文)作单位。

四、MTBF的计算公式

 MTBF=1/ λ

故障率$λ=X^{2}(α,2(r+1))/2T$

即：$MTBF=2T/X^{2}(α,2(r+1))$

 $T=\sum\_{}^{}(test time×number of samples×AF)$

式中：

    $X^{2}$是卡方分布函数；

α是信心水准；

r是测试样品故障数

示例：某产品的MTBF要求值：50,000hours；

 信心水准：90%

 测试样品数量：40pcs

 故障样品数量：0pcs

 测试时长：500hours/pcs

 测试温度：50℃

经计算：加速因子AF=6.09 （Ea取值0.6eV； Tu=25℃）

 $T=\sum\_{}^{}(test time×number of samples×AF)$

 =500hours×40pcs×6.09

 =122,000hours

 $MTBF=2T/X^{2}(0.9,2(0+1))$

 =244,000/4.605

 =52,986hours>50,000hours

五、MTBF计算的应用

根据上面的示例，我们可以根据已知要求来设计热加速测试的相关条件，例如：测试温度、测试时长、测试样品数量、故障样品数量等。

示例a：在上文示例中，假设有一个样品在100hours时出现故障，

则 $T=\sum\_{}^{}(test time×number of samples×AF)$

 =500hours×39pcs×6.09+100×1pcs×6.09

 =119,560hours

 $MTBF=2T/X^{2}(0.9,2(1+1))$

 =239,120/7.779

 =30,740hours<50,000hours

此时需要采取什么措施来继续证明产品的MTBF>50,000hours呢？

从公式可以看出，需要增大T，在不改变试验温度的情况下，则需要增加测试样品数量n或者加长试验时间t，且无样品再发生故障。

当增加测试样品数量n时：

 Tn=500hours×39pcs×6.09+100×1pcs×6.09+500hours×npcs×6.09 式1

 MTBF=2Tn/7.779>50,000hours 式2

结合式1与式2，计算得出：

 n>24.6

 即在不改变试验温度、测试时长的情况下，需要至少追加25pcs样品进行测试，而且无样品再发生故障，且能达到MTBF>50,000hours。

当加长试验时长时：

 Tt=500hours×39pcs×6.09+100×1pcs×6.09+t hours×39pcs×6.09 式3

 MTBF=2Tt/7.779>50,000hours 式4

结合式3与式4，计算得出：

 t>315.4

即在不改变试验温度、测试样品数量的情况下，对正常的39pcs样品需要至少追加测试316hours，而且无样品再发生故障，且能达到MTBF>50,000hours。

在上文中，万一一个样品故障出现故障，就只能新增测试样品或者增加测试时长，但在现实工作中，往往有无新样品供测试或者已经不允许追加测试时间了的情况出现，所以根据MTBF的计算公式，可以在试验开始前们就可以合理分配测试样品数量或者测试时长。

示例b：某产品的MTBF要求值：50,000hours；

 信心水准：90%

 测试样品数量：n pcs

 故障样品数量：r pcs （为了计算简便，假设都是在t hours时，试验结束时出故障）

 测试时长：t hours/pcs

 测试温度：50℃ （Ea取值0.6eV； Tu=25℃）

同上例计算方式，可以得出以下数据：

|  |  |
| --- | --- |
| 故障样品数量r | 参数关系式n\*t(单位：hours) |
| 0 | >18904 |
| 1 | >31934 |
| 2 | >43699 |
| 3 | >54853 |

注：本表中数据是基于示例b相关条件及假设值而计算得出，但都是依据公式计算得出的。

在实际生产过程中，可能存在多种试验并行的方式，从T的计算方式可以看出，多个试验的T是可以叠加合并的。

示例c：信心水准：90%

 测试样品数量：n1=20；n2=30

 故障样品数量：r1=1（100hours时出现故障），r2=0

 测试时长：t1=500hours；t2=600hour

 测试温度：tp1=50℃；tp2=60℃

计算如下：AF1=6.09；AF2=11.64 （Ea取值0.6eV； Tu=25℃）

 T1=(500\*19+100\*1)\*6.09=58464；

 T1=600\*30\*11.64=209520；

 T=T1+T2=267984

 $MTBF=2T/X^{2}(0.9,2(1+1))$

 =535968/7.779

 =68899 hours

六、MTBF计算的过程一些常规数值表

a.激活能Ea

 在Arrhenius Mode下的激活能是一个经验值，通常采取多次测试对比计算，但因为每次测试结果离散型，所以测试次数较少时，得出的激活能误差大，需要积累大量测试数量，采用统计学方式来计算Ea，方能得出较精确的值。

 常见电子元器件的激活能如下：

|  |  |
| --- | --- |
| 元器件 | Ea（eV） |
| 变压器 | 0.5 |
| 电阻 | 0.56 |
| 传感器 | 0.56 |
| 电容 | 0.6 |
| 线性模块 | 0.7 |
| 二极管 | 1 |
| 桥式整流器 | 1 |
| 晶体管 | 1 |
| 光隔离器 | 1 |

电脑类产品在计算MTBF时，通常整机激活能取值0.6eV。

b.加速因子AF

 通常情况下，使用条件温度Tu假定为25℃，此时计算出的AF值如下表：

|  |  |
| --- | --- |
| 测试温度Tt | 加速因子AF |
| 40℃ | 3.06  |
| 45℃ | 4.34  |
| 50℃ | 6.09  |
| 55℃ | 8.46  |
| 60℃ | 11.64  |
| 65℃ | 15.85  |
| 70℃ | 21.40  |

注：虽然测试温度越高，加速因子越大，从而可以考虑节省试验样品或减短试验时长，但该温度的设定是要求在该温度下，产品的各部位均不会因为高温而衍生异变。例如某产品额定工作时的稳升为40℃，若测试温度>60℃,则可以造成水汽在产品类异常聚集，再冷凝成水的过程，导致结构变形（水汽影响）或者电路短路（凝水）。故而测试问题不能一味调高，适当即可。

c. 卡方分布函数

在上文中卡方分布函数的相关数值如下：

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| No. of Failures | Confidence Level（**α**）  | No. of Failures | Confidence Level（**α**）  |
| （r）  | 60% | 90% | （r）  | 60% | 90% |
| 0 | 1.833 | 4.605 | 5 | 12.584 | 18.549 |
| 1 | 4.045 | 7.779 | 6 | 14.685 | 21.064 |
| 2 | 6.211 | 10.645 | 7 | 16.78 | 23.542 |
| 3 | 8.351 | 13.362 | 8 | 18.868 | 25.989 |
| 4 | 10.473 | 15.987 | 9 | 20.951 | 28.412 |

注：本文中卡放分布函数的r， α并不是值自由度和概率值，其关系式如下：

 自由度k=2（r+1）；概率值P=1-α。

七、Arrhenius Mode应用的实用性与局限性

 从上文中可以看出，只需要知道相关试验数据，就可以快捷推算出该产品的MTBF，使可靠性这个模糊的概念变成一个可以用数字来衡量的参数，从而了解产品的可靠性水准以及推算保固维修成本等，此种MTBF推算方式已得到大型国际电子产品企业（例如三星、LG）的认可，并向其供应商施行推广。

虽然Arrhenius Mode的实用性很好，但其也有其局限性。首先Arrhenius Mode只是一个经验模型，无法体现MTBF的真实值；其次，激活能Ea也是基于Arrhenius Mode前提下，根据大量实验及生产数据推算而来，而各类型的产品的Ea各不相同，在无大量数据的情况下，无法推算出Ea。

综上，各单位可以在Arrhenius Mode理论上，建立一套MTBF的衡量方式，在逐步数据积累过程中，逐步修正衡量方式及Ea，最终能较准确的衡量产品的可靠性。