

基于 Arrhenius 模型的汽车电子产品加速 寿命试验设计分析

王裕鹏, 高鑫, 陈文淼, 王涛, 宋兴鑫

(潍柴动力股份有限公司, 山东 潍坊 261061)

摘要: **目的** 对 Arrhenius 模型的基本方程进行分析, 为评估产品热应力水平提供试验设计方法。**方法** 推导寿命周期中多个温度点的加速因子和加速寿命试验时间, 并计算其等效温度点与寿命周期中各点温度和时间之间的关系, 得出等效温度的计算公式。**结果** 根据汽车电子产品温度的正态分布规律, 计算等效温度点曲线, 作为汽车电子加速寿命试验的输入, 通过算例说明与传统试验方法的差异性。**结论** 等效温度点法比传统试验方法更适应于各种温度分布, 可以更准确地评估产品热应力水平。

关键词: Arrhenius 模型; 汽车电子; 加速寿命试验

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2019.03.005

中图分类号: TP202+.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2019)03-0022-04

Design of Accelerated Life Test for Automotive Electronics Based on Arrhenius Model

WANG Yu-peng, GAO Xin, CHEN Wen-miao, WANG Tao, SONG Xing-xin
(Weichai Power Co., Ltd, Weifang 261061, China)

ABSTRACT: **Objective** To analyze the basic equations of the Arrhenius model and provide experimental design methods for evaluating the thermal stress level of products. **Methods** The acceleration factor and the accelerated life test time of several temperature points in the life cycle were derived, and the relationship between the equivalent temperature point and the temperature and time of each point in the life cycle was calculated. **Results** According to the normal temperature distribution of automotive electronic products, the equivalent temperature point curve was calculated as the input of automotive electronic acceleration life test to demonstrate the difference with the traditional test methods through examples. **Conclusion** The equivalent temperature point method is more suitable for all kinds of temperature distribution than the traditional method and can evaluate the thermal stress level of products more accurately.

KEY WORDS: Arrhenius model; automotive electronics; accelerated life test

随着汽车产业的发展, 汽车电子产品的种类和功能也越来越多, 相较于消费电子产品和工业电子产品, 汽车电子产品具有工作环境恶劣、复杂, 安全性和可靠性要求高等特点, 如何提高汽车产品可靠性成为一个重要的课题。汽车电子产品的使用设计寿命一般在 10 000 h 以上, 而贮存设计寿命更是达到 10 年以上。单纯地模拟产品的使用环境进行试验是不现实

的, 根据产品的失效机理进行产品的加速寿命试验可以为企业节省大量试验成本和时间成本。

在汽车电子产品的失效中, 热应力失效占据很大的比例, 如何快速、准确地评价产品的热应力水平成为保证产品可靠性的关键。Arrhenius 模型是由瑞典化学家 Arrhenius 所建立的化学反应速率随温度变化关系的经验公式, 被广泛应用于各类产品的加速试验

中, 文中根据 Arrhenius 模型讨论汽车电子加速寿命试验中加速因子和等效温度点的计算。

1 Arrhenius 模型分析

Arrhenius 模型是最常见的应用于可靠性试验中的寿命-应力模型, 它被广泛地应用于各类产品的温度加速寿命试验中^[1-2]。该模型公式为:

$$AF = e^{\left[\left(\frac{E_a}{k} \right) \times \left(\frac{1}{T_{\text{test}}} - \frac{1}{T_{\text{field}}} \right) \right]} \quad (1)$$

式中: AF 为加速应力 T_{test} 相对于实际应力 T_{field} 的加速因子, 即温度 T_{test} 下的反应速率是在温度 T_{field} 下的 AF 倍; E_a 为活化能, eV, 与试验产品材料相关 (0.6~1.1), 在公式中被视为与温度无关的常数; k 为 boltzmann 常数 (8.6171×10^{-5} eV/K); T_{test} 为试验温度, K; T_{field} 为实际使用温度, K^[3-5]。

由式 (1) 可见, 在加速寿命试验设计中, 关键是参数 T_{test} 和 T_{field} 的选取。在保证温度为 T_{test} 和 T_{field} 时产品失效一致性的情况下, 为使 AF 尽可能大, T_{test} 通常选用产品最大设计温度。

在其他产品的加速寿命试验中, T_{field} 通常选用产品工作范围的中位数或温度-时间的加权平均值。由于其他产品的实际工作温度一般在室温左右, 往往可以得到很大的加速因子, 以此进行加速寿命试验可以保证产品一定的可靠性^[7-10]。相较于其他产品, 汽车电子产品的使用环境具有更广泛的温度分布, 根据试验结果和失效分析证明, 这种试验设计并不适用于汽车电子产品。

2 加速试验设计

2.1 等效温度点计算

若在寿命周期内共有 M 个温度点, 分别记为 $T_1, T_2, \dots, T_M$, 在对应温度点下的时间分别为 $t_1, t_2, \dots, t_M$, 则:

$$\sum_{i=1}^M t_i = t_{\text{field}} \quad (2)$$

式中: t_{field} 为试验产品的使用寿命^[11-12]。

根据式 (1), 实际应力 T_i 对应的加速应力 T_{test} 下的加速寿命时间为:

$$t_{\text{itest}} = \frac{t_i}{AF(T_i)} = t_i \cdot e^{\left[\left(\frac{E_a}{k} \right) \times \left(\frac{1}{T_{\text{test}}} - \frac{1}{T_i} \right) \right]} \quad (3)$$

根据式 (2)、式 (3) 计算整理后可得, 总的试验时间 t_{test} 为:

$$t_{\text{test}} = \sum_{i=1}^M t_{\text{itest}} = e^{\left[\left(\frac{E_a}{k} \right) \cdot \frac{1}{T_{\text{test}}} \right]} \sum_{i=1}^M t_i e^{\left[\left(\frac{E_a}{k} \right) \cdot \frac{1}{T_i} \right]} \quad (4)$$

另假设存在一等效温度点 T_a , 加速应力 T_{test} 相对

于 T_a 的加速因子可以满足:

$$t_{\text{itest}} = \frac{t_{\text{field}}}{AF(T_a)} \quad (5)$$

即:

$$t_{\text{itest}} = e^{\left[\left(\frac{E_a}{k} \right) \cdot \frac{1}{T_{\text{test}}} \right]} \cdot t_{\text{field}} \cdot e^{\left[\left(\frac{E_a}{k} \right) \cdot \frac{1}{T_a} \right]} \quad (6)$$

将式 (4) 和式 (6) 整理后得:

$$t_{\text{field}} \cdot e^{\left[\left(\frac{E_a}{k} \right) \cdot \frac{1}{T_a} \right]} = \sum_{i=1}^M t_i e^{\left[\left(\frac{E_a}{k} \right) \cdot \frac{1}{T_i} \right]} \quad (7)$$

2.2 温度参考点仿真

在汽车电子产品中, 由于各电路功能的不同, 在产品外壳上的温度分布是不同的, 定义温度参考点对于试验的可重复性有重要意义。对产品的几何外廓、电路布局特性、各元器件的物性参数、封装形式以及机壳的结构尺寸进行研究, 建立产品的三维热分析模型。通过热负荷仿真分析外壳温度分布, 将外壳温度最高点作为温度参考点。某款产品的外壳温度场分布如图 1 所示, 可见外壳最高温度在背部散热片处。

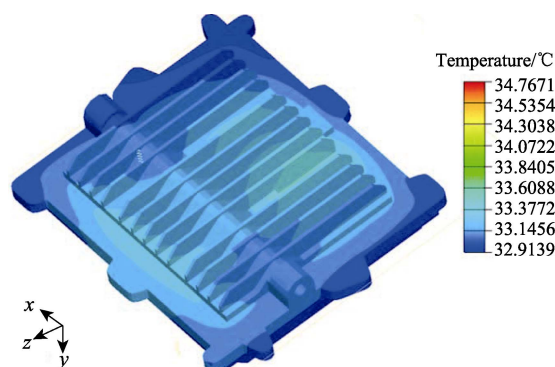


图 1 某产品的外壳温度场分布

2.3 汽车电子的温度分布

在产品的温度参考点处布置温度传感器, 通过安装在整车上的车载数据采集终端采集 100 台产品温度参考点的全寿命周期温度分布, 将实时采集的数据传送至云平台, 如图 2 所示。整理数据后得出, 汽车产品温度覆盖范围为 $-40 \sim 105$ °C, 在温度范围内近似于符合正态分布:

$$f(T) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times \sigma} e^{-\frac{(T-T_0)^2}{2\sigma^2}} \quad (8)$$

式中: T_0 为温度分布的位置参数; σ 为温度分布的尺度参数。

T_0 与产品的安装位置相关, 比如安装在发动机舱的产品一般在 333 K 左右, 安装在驾驶室的产品一般为 298 K 左右。 σ 与产品的安装位置、整车运行环境相关, 安装于驾驶室外的产品会大于驾驶室内安装产品。

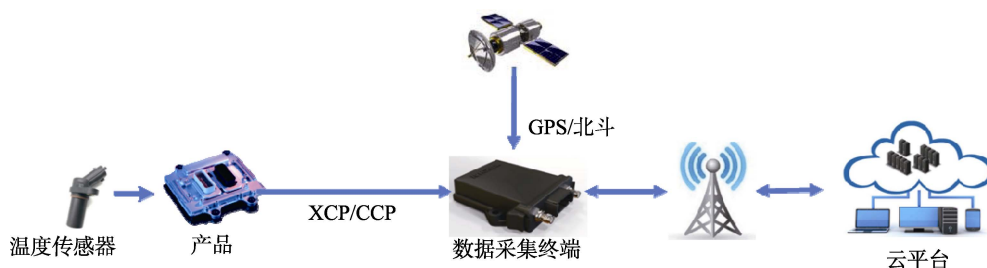


图2 数据采集

3 等效温度点法应用

设某汽车电子产品温度分布满足 $T_0=313\text{ K}$, $\sigma=25$ 的正态分布, $t_{\text{field}}=20\,000\text{ h}$, $T_{\text{test}}=378\text{ K}$, $E_a=0.6\text{ eV}$, 计算其加速寿命试验时间及等效温度点温度。由式(1)可得, 温度越低, 加速因子越大。当 $T=273\text{ K}$ 时, $AF=1193$, 对于整体试验时间影响很小, 所以对 273 K 以下的温度不进行详细计算。

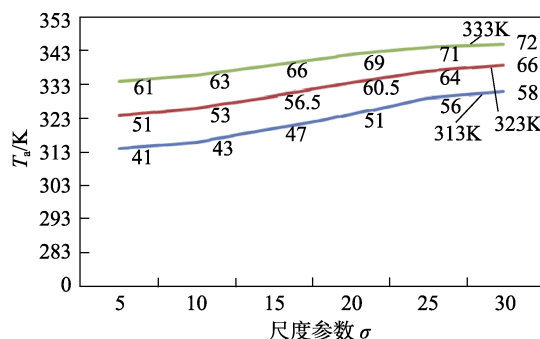
根据式(1)和式(3)计算温度-寿命分布, 见表1。

表1 温度-寿命分布

温度/K	寿命时间/h	加速寿命时间/h
< 273	1326	0.65
278	601	0.80
283	780	1.61
288	972	3.07
293	1163	5.56
298	1338	9.53
303	1479	15.48
308	1570	23.87
313	1602	34.94
318	1570	48.59
323	1479	64.23
328	1338	80.72
333	1163	96.52
338	972	109.85
343	780	119.03
348	601	122.86
353	445	120.84
358	317	113.29
363	217	101.28
368	142	86.35
373	90	70.25
378	55	55

根据式(7)计算可得: $T_a=329\text{ K}$ 。将 $T_a=329\text{ K}$ 代入式(1), 可得此时的加速因子为: $AF=15.54$ 。在正态分布下, 位置参数 T_0 即为温度的加权平均温度, 若采用此温度计算加速因子, 可得: $AF=45.85$ 。

由两个加速因子可见, 在此算例中, 若采用加权平均温度计算加速因子, 会导致试验验证不充分, 不能有效评估产品的可靠性。根据以上算例, 在 t_{field} 、 T_{test} 、 E_a 不变情况的下, 分别计算不同 T_0 和 σ 下的 T_a 值, 如图3所示,

图3 不同 T_0 和 σ 下的 T_a 值

从图3中可以看出: 当尺度参数 σ 小于5时, 等效温度 T_a 接近于位置参数 T_0 , 即当被测产品在寿命周期中温度变化较小时, 可以使用温度分布的加权平均值作为 Arrhenius 模型的输入值。当尺度参数 σ 较大时, 等效温度 T_a 与 T_0 相差较大, 即当被测产品在寿命周期中温度变化较大时, 必须分别计算在各个温度点下的加速因子和加速寿命时间。

4 结论

文中通过分析 Arrhenius 模型和汽车电子温度分布, 结合两者计算加速寿命因子和加速寿命试验, 从中得到了温度分布与等效温度点之间的规律。

1) 与传统的加速寿命试验设计方法相比, 等效温度点法根据真实采集数据作为输入, 分段式计算加速因子, 可以更准确地评估产品热应力水平。

2) 寿命周期中, 产品工作温度的分布尺度参数对传统加速寿命试验设计方法影响很大。当尺度分布参数大于一定值时, 传统试验设计方法将不满足试验设计需要, 而温度参考点法可以很好地避免此问题。

参考文献:

- [1] NELSON W B. Accelerated Life Testing-step-stress

- Model Sand Data Analysis[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1980, 29(2): 103-108.
- [2] HARTLER G. Parameter Estimation for the Arrhenius Model[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1986, 35(4): 414-418.
- [3] NELSON W. Accelerated Testing-Statistical Model, Test Plans and Data Analysis[M]. New York: John Wiley & Sons, 1990: 496-502.
- [4] 何国伟, 戴慈庄. 可靠性试验技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
- [5] 姜同敏, 王晓红. 可靠性与寿命试验[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012: 143-144.
- [6] GJB 1032—90, 电子产品环境应力筛选方法[S].
- [7] 葛瑞格 K 霍布斯. 高加速寿命试验与高加速应力筛选[M]. 北京: 航空工业出版社, 2012.
- [8] 樊强. 高加速寿命试验和高加速应力筛选试验技术综述[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2011, 29(4): 58-62.
- [9] 陈循, 陶俊勇, 张春华. 可靠性强化试验与加速寿命试验综述[J]. 国防科技大学学报, 2002, 24(4): 29-32.
- [10] 吴曼林, 唐其环, 万军. 加速寿命试验与高加速寿命试验的比较分析[J]. 装备环境工程, 2007, 4(2): 43-45.
- [11] 朱建华, 钟浩. 如何确定高加速寿命试验的应力极限[J]. 环境技术, 2012(6): 7-8.
- [12] 申争光, 苑景春, 董静宇, 等. 弹上设备加速寿命试验中加速因子估计方法[J]. 系统工程与电子技术, 2015(8): 1948-1952.