

# Multi-Physical Coupling-Based Automotive-Grade Chip Life Prediction

Linyi Xie<sup>1</sup> Jia Cheng<sup>2</sup> Lang Su<sup>1</sup> Qingshu Huang<sup>1</sup> Liang Ran<sup>2</sup>

1. Runxi Microelectronics Chongqing Co., Ltd., Chongqing, 400060, China

2. Huarun Microelectronics Co., Ltd. Chongqing Key Laboratory, Chongqing, 400060, China

## Abstract

Driven by the “Dual Carbon” strategic goals, the new energy vehicle industry has flourished, making automotive-grade chips a core component of intelligent connected technologies. Therefore, reliability testing before mass production becomes particularly crucial. Among these, life assessment—specifically the calculation of Mean Time to Failure (MTTF)—has become a systematic project that provides critical evidence for evaluating product lifespan. However, due to the long-standing lack of clear and unified MTTF measurement standards, the accuracy of current life predictions remains challenging. This paper focuses on introducing relevant MTTF calculation methods to provide references for implementing life assessment work.

## Keywords

automotive-grade chips, accelerated model, life prediction, FIT

# 基于多物理耦合的车规芯片寿命预测

谢林毅<sup>1</sup> 程佳<sup>2</sup> 粟浪<sup>1</sup> 黄青树<sup>1</sup> 冉亮<sup>2</sup>

1. 润西微电子重庆有限公司, 中国·重庆 400060

2. 华润微电子重庆重点实验室, 中国·重庆 400060

## 摘要

在“双碳”战略目标推动下, 新能源汽车产业蓬勃发展, 车规芯片成为智能网联技术的核心部件, 故在批量投产前的可靠性测试显得尤为重要。其中寿命评估—即平均无故障时间 (MTTF, Mean Time To Failure) 的测算已成为一项系统性工程, 其为评估产品寿命提供了重要依据。然而, 由于长期以来缺乏明确统一的MTTF系统测算标准, 导致当前寿命预测的准确性仍面临挑战。本文重点介绍了MTTF的相关计算方法, 为寿命测算工作的实施提供参考。

## 关键词

车规级芯片; 加速模型; 寿命预测; FIT

## 1 引言

新能源汽车作为重塑全球汽车产业格局、实现“碳达峰”与“碳中和”战略目标的核心载体, 已被全球主要经济体提升至国家战略层面, 其核心竞争力不再局限于电池续航与驱动技术, 更深入体现在车辆的智能化水平上。因此, 当前新能源汽车已逐渐演变为一个融合机械、电子与人工智能技术的复杂移动智能终端。在此变革背景下, 车规级智能芯片成为决定新能源汽车性能、安全与用户体验的核心部件。此外, 芯片的寿命直接影响整车的行车安全与驾驶体验。故对芯片在长期服役下的寿命预测至关重要。本文立足于国家新能源汽车发展战略对核心零部件自主可控与高可靠性的迫切需求, 聚焦于新能源汽车关键系统的车规级芯片, 深入研

究其寿命预测问题。本文阐述了当前主要的加速模型, 根据多物理耦合的可靠性试验, 推算出了车规芯片的寿命值。

## 2 加速模型

可靠性指的是产品在规定条件下与规定时间内完成要求功能的能力。而对于车规芯片其使用寿命至少在十五年甚至是更久, 显然不可能将芯片在规定的条件运行十几年来预测其寿命。故通过寿命加速模型 (Accelerated Life Models, ALMs), 可在较短时间内评估车规级产品在正常使用条件下的预期寿命。该模型通过施加高于正常水平的应力 (如温度、湿度、电压等) 加速产品失效过程, 从而缩短试验周期, 实现快速验证产品可靠性的目的。常见的寿命模型有阿伦尼乌斯模型 (Arrhenius Model)、科菲—曼森模型 (Coffin-Manson Model)、Peck 模型 (Hallberg-Peck Model)。

Arrhenius 模型是应用最广泛的加速模型, 主要适用芯片受温度影响的试验, 如高温工作寿命试验、高温栅极反偏

【作者简介】谢林毅 (1997-), 女, 中国重庆, 硕士, 工程师, 从事电子信息研究。

试验、高温存储试验等，其模型公式为：

$$A_F = \exp \left[ \frac{E_a}{k} \left( \frac{1}{T_{use}} - \frac{1}{T_{test}} \right) \right] \quad (1)$$

其中， $A_F$  为加速因子，即寿命加速的倍数；

$k$  为玻尔兹曼常数，约为  $8.617 \times 10^{-5} \text{eV/K}$ ；

$T_{use}$  为正常使用温度（开尔文温度，摄氏度加上 273.15 即为开尔文温度）；此温度取决于产品使用的平均环境温度，本文计算取值为  $55^\circ\text{C}$

$T_{test}$  为加速应力温度（开尔文温度）；

$E_a$  为失效机制的激活能，即材料化学键从正向状态向劣化状态转变所需要的最小能量。单位是  $\text{eV}$ （电子伏特）。这是模型的关键参数，不同失效机制有其典型的  $E_a$  值，如表 1 所示。

表 1 故障模式、故障机理和激活能<sup>[1]</sup>

故障模式	故障机理	激活能
开路	Al 腐蚀	0.6-0.9
开路	Al 电迁移	0.6
短路	氧化膜破坏	0.3
漏电流增加	反型层的形成 (MOS)	0.8-1.0
漏电流增加	沟道效应	0.5

Coffin-Manson 模型主要考虑热循环对芯片的影响，适用于温度循环试验，其加速模型为：

$$A_F = \left( \frac{\Delta T_{test}}{\Delta T_{use}} \right)^n \quad (2)$$

其中， $\Delta T_{test}$  为芯片在应力下的温升，即温度变化值，如温度循环试验条件为  $-55\sim 150^\circ\text{C}$ ，则  $\Delta T_{test}$  的值为 205；

$\Delta T_{use}$  为芯片在正常运行下的温升；

$n$  为该模型的指数系数。

在可靠性试验中除了考虑温度对芯片的影响，还会增加湿度、电压等多物理耦合因子。综合温度与湿度，引出了劳森模型（Lawson model），其表达式如下：

$$A_F = \exp \left[ \frac{E_a}{k} \left( \frac{1}{T_{use}} - \frac{1}{T_{test}} \right) + b(RH_{test}^2 - RH_{use}^2) \right] \quad (3)$$

其中， $RH_{test}$  为芯片在试验下的湿度；

$RH_{use}$  为芯片在使用时的湿度。

$b$  为常数，一般取值为  $5.57 \times 10^{-4}$

长期以来的测试结果表明，在某些情况下，Lawson 模型对加速测试效应的表征存在一定偏差。当前在温湿度加速模型方面，无论是国际标准 AECQ-100 还是国内标准 GB/T 34986-2017，普遍采用的都是 Hallberg-Peck 模型。该模型

是在 Arrhenius 模型基础上引入了湿度应力因子，其表达式如下：

$$A_F = \left( \frac{RH_{test}}{RH_{use}} \right)^p \cdot \exp \left[ \frac{E_a}{k} \left( \frac{1}{T_{use}} - \frac{1}{T_{test}} \right) \right] \quad (4)$$

其中， $RH_{test}$  为芯片在  $T_{test}$  下的湿度；

$RH_{use}$  为芯片在  $T_{use}$  下的湿度。

$p$  为湿度加速率常数，在不同失效模式下具有不同的值<sup>[2]</sup>。

### 3 寿命预测

上文对常用的加速模型进行了介绍，本小节将在此基础上推到适用与温湿度与温度循环的寿命预算模型。JEDEC85<sup>[3]</sup>中给出了以 FIT（Fail in time）为单位的失效率推测方式，如 1FIT 则表示在  $10^9\text{h}$  内出现 1 次故障。FIT 计算公式如下：

$$FIT = \lambda \cdot 10^9 = \frac{chi^2 \cdot 10^9}{2 \cdot T_{total} \cdot A_T} \quad (5)$$

其中， $chi^2$  为卡方值；在 JESD 47 中给出了在 60% 的置信度下，芯片零失效时的卡方值为 1.84。本文研究产品为车规芯片，车规产品在可靠性实验中的失效标准为零失效。故  $chi^2$  取值为 1.84

$T_{total}$  为总的试验时间，该处总的时间为换算成小时为单位制的时间总和；

$A_T$  为总的加速因子，即所有有效实验的加速因子的总和。

$\lambda$  表示产品的失效率。

汽车零部件因其件质量水平及工作环境等因素，在使用一段时间后可能发生失效。对于不可维修的产品而言，一旦失效，即意味着其寿命终止。平均寿命通常以平均失效前时间 MTTF 表示，也称为平均故障时间。其与 FIT 的关系如下：

$$MTTF = \frac{10^9}{FIT} \quad (6)$$

为预测某车规芯片在实际使用场景用的寿命，对其进行带有温度、电压、湿度的加速可靠性试验。同时，结合上述小节的加速因子模型计算出相应的加速因子，其结果如表 1 所示。

最后根据式（4），即可得出 FIT 的值为 18。表示该产品累计运行  $10^9\text{h}$  里预计出现 18 次故障。同时可计算出 MTTF 的值为 6279.5 年，表明该产品平均需要约 6279.5 年才会发生一次故障，进一步体现了该产品具有极高的可靠性且符合当前车规芯片的高可靠性要求。

表2 可靠性试验结果与加速因子

试验名称	试验条件	测试时间	试验结果	加速因子
高温反偏试验	150℃, 520V, 1000hrs	1000hrs	0/77	259
高温栅偏试验	150℃, 30V, 1000hrs	1000hrs	0/77	259
温度循环试验	-55~150℃, 1000cycles	500hrs	0/77	74
无偏压高加速试验	130℃, 85%RH, 96hrs	96hrs	0/77	1065

#### 4 结语

本文阐述了适用于温度、湿度、温度循环试验的的加速模型，并更具寿命预测模型，预测了一款车规芯片的使用寿命，为寿命测算工作的实施提供参考。本文寿命预测方法存在一定局限性，为了进一步提高预测精度，同时具备广泛性，未来可开展以下研究方向：

(1) 构建多种环境模式下的预测模型。基于物理失效机理的内部建模虽能反映器件退化本质，但通常依赖于单一应力加速实验数据构建解析模型。这类方法难以充分融合磁场、紫外线、振动等多场耦合的环境应力条件，无法精确表征复杂工况下芯片的综合老化过程与寿命衰减规律。故后期

可研究适配更多耦合环境的寿命预测模型。

(2) 构建考虑芯片工艺特点的预测模型。芯片的寿命不仅与所处的应力环境有关，还与本身的制造结构与工艺相关，故后期可研究与工艺结构相融合的寿命预测模型。

#### 参考文献

- [1] 帕特里克·D·T·奥康纳, 安德烈·克莱纳. 可靠性工程师手册[M]. 祈宁, 顾璞, 译. 2版. 北京: 中国人民大学出版社, 2014.
- [2] JEDEC Solid State Technology Association. Failure mechanism based stress test qualification for integrated circuits: JESD47H.01 [S/OL]. Arlington, VA: JEDEC, 2018 [2023-10-27].
- [3] JEDEC Solid State Technology Association, JESD85: Methods for Calculating Failure Rates in Units of Fits[S], 2021.