

Application Note

计算嵌入式处理器的有效使用寿命



Allan Webber

摘要

本应用报告介绍了如何计算 TI 嵌入式处理器 (EP) 在电子系统中运行时的有效使用寿命。本文档的目标读者为希望确定 TI EP 的可靠性是否符合终端系统可靠性要求的总工程师。电迁移是建模的主要故障机制。

内容

1 简介.....2

2 可靠性阶段和有效使用寿命.....2

3 CMOS 磨损机制和 IC 设计.....3

4 温度对电迁移的影响.....3

 4.1 工作结温低于 105°C T_J.....3

 4.2 工作结温高于 105°C T_J.....5

5 系统任务剖面的电迁移分析.....5

6 有效使用寿命和 MTTF 值.....6

7 本文档的局限性.....6

8 修订历史记录.....6

插图清单

图 2-1. 显示不同可靠性阶段的浴盆曲线.....2

图 4-1. 过热时电迁移对 TI 嵌入式处理器的影响.....3

图 4-2. 阿仑尼乌斯方程.....4

图 4-3. 相对于 105°C 的加速因子 (AF).....4

图 5-1. 评估系统级任务剖面 and 元件可靠性的示例.....6

表格清单

表 4-1. 降额至高于 105°C T_J.....5

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

本文档介绍了可靠性的三个阶段，并展示了当前一代 TI 工业级 EP 产品旨在支持在 105°C 结温 (T_J) 下工作 10 年的有效使用寿命。

它基于失效物理方法，显示了有效使用寿命随温度而变化，并且将有效温度降至 105°C T_J 以下可将器件的有效使用寿命延长到 10 年以上。同样，将有效温度增加到高于 105°C T_J 将会缩短寿命。

通过对实际系统级任务剖面的案例研究，它展示了如何计算 EP 是否会在设计的目标有效使用寿命内运行。

2 可靠性阶段和有效使用寿命

在考虑到‘可靠性’时，考虑寿命的三个阶段：

- 早期寿命 — 随机缺陷导致的故障率下降。
- 有效使用寿命 — 故障率相对恒定的稳定状态周期。
- 磨损 — 寿命终止机制开始发生且故障率增加的阶段。

图 2-1 将此显示为“浴盆曲线”剖面，其中曲线的边缘反映了浴盆的形状。

电子器件可靠性的重点是有效使用寿命，也称为稳定状态周期，其中它以时基故障 (FIT) 表示：故障次数/10⁹ 小时。

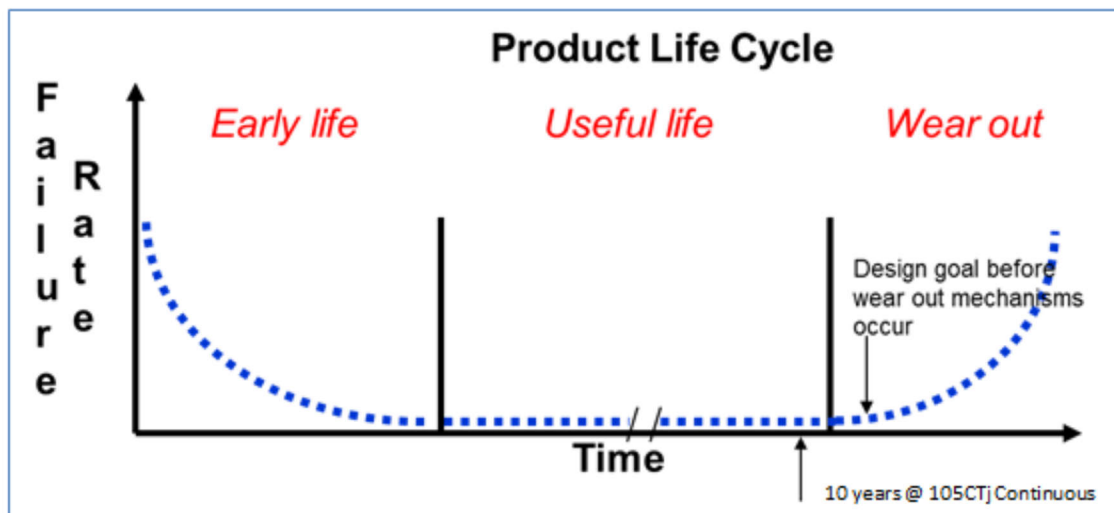


图 2-1. 显示不同可靠性阶段的浴盆曲线

许多工业系统需要 10 年或更短的有效使用寿命，但 TI 建模的最近可靠性剖面示例超过该年限，包括：

- 电信设备：连续运行 15 年
- 工厂供电系统中的工业控制器：连续运行 15 年
- 光伏逆变器：连续运行 15 年
- 水表：连续运行 15 年
- 电子仪表：连续运行 20 年

3 CMOS 磨损机制和 IC 设计

当前一代 TI 工业级嵌入式处理器产品旨在支持在 105°C 结温 T_J 下工作 10 年的有效使用寿命。

10 年有效使用寿命假定最差情况是 100% 加电并在恒定的 105°C T_J 温度下运行。

TI EP 产品专为提高可靠性而设计，因此磨损机制的起始点发生在有效使用寿命之后。图 2-1 说明了这一点。

旨在实现的出色器件磨损机制的稳健性包括：

- 栅极氧化层完整性 (GOI)
- 电迁移 (EM)
- 时间依赖性电介质击穿 (TDDB)

此外，产品设计中还考虑了导致整个生命周期内参数变化的机制，例如负偏置温度不稳定性 (NBTI) 和通道热载流子 (CHC)。

对于大多数硅技术，关键的磨损机制是 EM。

4 温度对电迁移的影响

电迁移是半导体中的主要磨损机制之一。与电迁移有关的最重要变量是器件的结温 (T_J)。假设器件在指定的数据表电压范围内工作，在电气偏置下影响器件寿命的关键变量是器件的结温 (T_J)。

图 4-1 显示了在 TI 专有器件节点上，EM 的起始点如何随 T_J 变化。请注意，EM 性能可能因技术而异，但故障率与温度间的关系原则适用：长时间在极端温度下运行（高于 105°C）将缩短寿命。

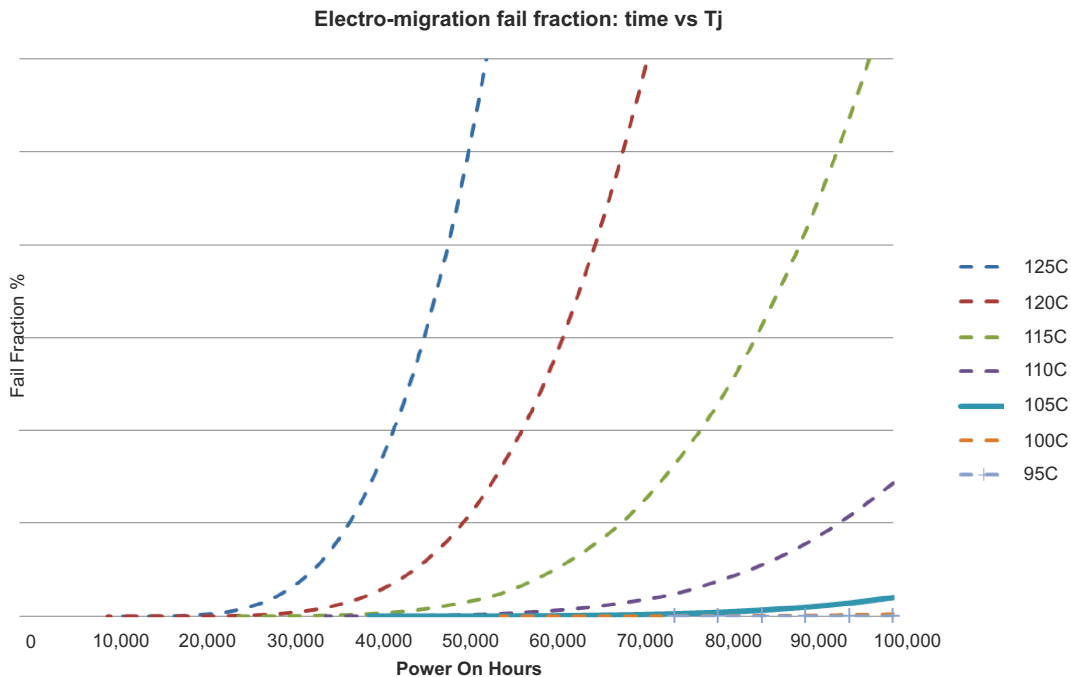


图 4-1. 过热时电迁移对 TI 嵌入式处理器的影响

电容器电子可靠性的一条经常引用的经验法则是每升高 10°C，寿命大约减半。对于半导体，它具有类似的变化，但在较高的温度下会出现滑移。

因此，建议查看上电条件的两种情况：等于或低于 105°C 和高于 105°C。

4.1 工作结温低于 105°C T_J

在 105°C T_J 或更低温度工作时，应用阿仑尼乌斯方程来确定加速因子 (AF) (参阅图 4-2)。

$$AF = \exp\left(\frac{Ea}{k}\left(\frac{1}{T_{use}} - \frac{1}{T_{stress}}\right)\right)$$

图 4-2. 阿伦尼乌斯方程

其中，

AF = 加速因子

Ea = 以 eV 为单位的激活能

k = 玻尔兹曼常数 (8.63 x 10⁻⁵ eV/K)

T_{use} = 以 K 为单位的使用温度 (C + 273)

T_{stress} = 以 K 为单位的应力温度 (C+273)

图 4-3 使用 0.7eV 的热激活能 Ea (用于评估器件可靠性的常见 Ea) 绘制了 105°C 下每 5°C 的 AF。

它表明如果处理器在 90°C 有效温度下运行，而不是在 105°C 下运行，则可以预测有效使用寿命提高 2 倍。换句话说，如果应用将热性能管理在‘有效’ T_J 90°C 或更低，则可以使器件有效使用寿命达到 20 年。

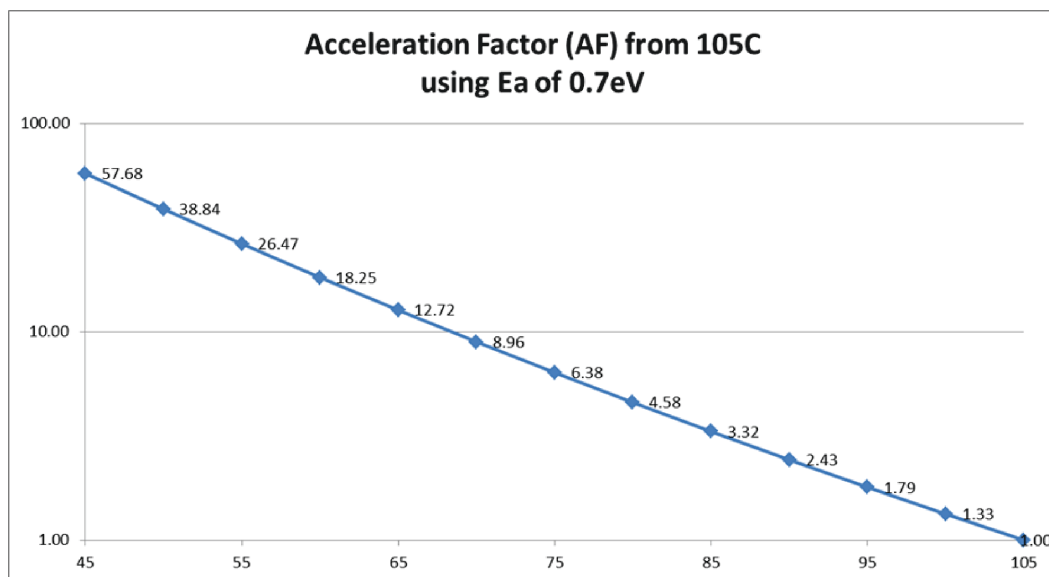


图 4-3. 相对于 105°C 的加速因子 (AF)

4.2 工作结温高于 105°C T_J

对于额定温度高于 105°C T_J 的扩展温度范围器件，图 4-1 表明运行温度较高会缩短有效使用寿命。

为了便于进行不涉及磨损机制复杂计算的高级计算，表 4-1 显示了用于 105°C 情况的保护频带 AF。

表 4-1. 降额至高于 105°C T_J

温度	加速因子
105°C	1.00
110°C	0.50
115°C	0.40
120°C	0.30
125°C	0.20

表 4-1 显示如果设计为在 105°C T_J 下运行 10 年的嵌入式处理器在 125°C T_J 下连续运行，则 2 年有效使用寿命应是其可靠性预算。

备注

保护频带 AF 足以满足大多数应用的要求。如果扩展温度范围内的应用需要更精确的建模，请联系 TI 获取可靠性相关帮助。

备注

对于高于 105°C T_J 的汽车级产品，其可靠性任务剖面旨在实现 15 年的 AEC-Q100 任务剖面，占空比为约 12%。T_{max} 下的总时间通常是其总加电时间的一小部分。

5 系统任务剖面的电迁移分析

应用在一个温度下 100% 运行的情况很少见。更实际的情况是整个生命周期在分布式温度范围内运行。应用的温度与时间之间的映射称为任务剖面。

大多数情况下，任务剖面会规定导通时间与关断时间，称为占空比。占空比的重要性在于，对于需要偏置的可靠性机制（传统 CMOS 磨损），断电可以停止时钟。

图 5-1 显示了一个光伏逆变器应用任务剖面的真实案例，该应用要求有效使用寿命 15 年且导通时间 100%。在本例中，T_A 和 T_J 之间的增量为 20°C。要根据环境温度或管壳温度计算结温，请参阅器件特定数据表。

最终结果表明，任务剖面要求 EP 相当于在 105°C T_J 下运行 3.4 年，并在设计的 105°C T_J 下轻松运行 10 年。

Solar Inverter Profile						
1. Convert days to Power on Hours/ year						
2. PoH / year x years x duty cycle						
3. convert Ta -> Tj (+20C in this example but will vary per device)						
4. Derating from 105C Tj to actual Tj - see table below						
5. Calculate PoH per Tj interval x AF						
CUSTOMER MISSION PROFILE						
LIFETIME	15 YEARS					
DUTY CYCLE :	100% ON					
Days/year	Ambient temperature	PoH / yr	Total PoH	Tj	AF from 105C *	Equiv to 105C Tj hrs
15	+30° C	360	5400	50	38.84	139
25	+45° C	600	9000	65	12.72	708
90	+55° C	2160	32400	75	6.38	5,078
185	+60° C	4440	66600	80	4.58	14,541
35	+70° C	840	12600	90	2.43	5,185
15	+80° C	360	5400	100	1.33	4,060
		8,760	131,400 hrs			29,712 hours
*Derating 105C to lower temperatures						3.4 Years
Temperature	Acceleration Factor using 0.7eV					
45	57.68					
50	38.84					
55	26.47					
60	18.25					
65	12.72					
70	8.96					
75	6.38					
80	4.58					
85	3.32					
90	2.43					
95	1.79					
100	1.33					
105	1.00					

Summary: The customer profile is equivalent to 3.4 years @ 105C Tj.

Since it was designed to have 10 years @ 105C Tj lifetime, It will still be operating within its useful lifetime (ie/ it has only consumed 34% of it's useful lifetime).

图 5-1. 评估系统级任务剖面和元件可靠性的示例

6 有效使用寿命和 MTTF 值

可能会混淆有效使用寿命和平均故障时间 (MTTF) 值，但它们指的是可靠性的不同方面。

此处显示的有效使用寿命计算评估元件是否会超过系统可靠性要求。对于终端行业，TI 建模的对系统有效使用寿命的最长要求是计量应用的 20 年有效使用寿命。（在此类室外应用中，环境温度有助于降低有效温度。）

另一方面，MTTF 是预测整个总体故障之间的算术平均时间，其中它是时基故障率的倒数。MTTF 的数量级比有效使用寿命长。

7 本文档的局限性

- 并非所有 TI 的嵌入式产品都支持 10 年和 105°C Tj 的有效使用寿命。POH/有效使用寿命有限的器件会在其器件特定数据表中规定。
- 本文档中讨论的可靠性仅限于在加电条件下的半导体可靠性（器件寿命）。这不包括需要单独进行可靠性评估的封装可靠性条件评估。
- 本应用报告未考虑非易失性存储器的数据保留期。更多有关这些值的信息，请参阅器件特定数据表。
- 对于使用 28 nm 和较新工艺技术的器件，除了已发布数据表中包含的内容之外，还必须将其他用例条件纳入 POH 评估中。如需更多信息，请与您本地的 TI 代表联系。

8 修订历史记录

注：以前版本的页码可能与当前版本的页码不同

Changes from Revision B (March 2020) to Revision C (October 2026)	Page
---	------

- 更新了整个文档中的表格、图和交叉参考的编号格式..... 1
-

Changes from Revision A (October 2017) to Revision B (March 2020)	Page
---	------

- 对 [节 2](#) 进行了更新。 2
-

重要通知和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、与某特定用途的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他安全、安保法规或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 销售条款](#)、[TI 通用质量指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款或 TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月