

半导体器件功率循环和热循环计算简介

关于本文档

范围和目的

本应用笔记是AN2010-02，“IGBT4功率循环曲线使用” [1]的替代，适用于以下产品：工业用功率模块（带基板/不带基板）、智能功率模块（IPM）以及分立器件。

本文档提供了使用英飞凌功率循环和热循环曲线的所有必要信息，以及如何应用雨流计数算法进行正确的计算。

目录

关于本文档.....	1
目录	1
1 简介	2
2 功率循环	3
2.1 关键定义和术语.....	3
2.2 应用示例.....	8
3 热循环.....	11
4 雨流计数算法计算寿命	13
5 参考文献	16
文档修订记录	16

1 简介

在使用同一类型的工业功率模块、IPM模块或分立器件时，不同负载、不同热环境引起不同程度的热应力。为确保功率半导体器件预期寿命，需要采用合适的技术评估。负载引起的热应力不应超出相应的限制。

在讨论半导体产品的循环能力时，有两种类型：与结温变化 ΔT_{vj} 相关的功率循环（PC），以及与焊层和壳体温度变化 ΔT_c 相关的热循环（TC）。

本应用笔记有助于深入理解这些失效机理，以及相应的功率和热循环曲线。

本应用文档详细讨论了工业功率模块如何使用功率和热循环曲线的方法。

关于IPM模块和分立产品，应用笔记仅专注于功率循环曲线。因此，所述热循环信息不适用于这两类产品。

由于该应用笔记涵盖不同类型的产品，例如它们在结构、电流密度、尺寸和半导体技术等方面有所差异，因此必须采用特定应用产品的可靠性曲线。

半导体器件功率循环和热循环计算简介

功率循环

2 功率循环

通常，本文档讨论产品，包括工业功率模块、IPM（智能功率模块）和分立器件，都采用绑定线进行电气互连，如文中图 1 所示。

例如，图 1 中展示的 IGBT 功率模块，大约包含 450 根绑定线和 900 个键合点。多年来，该连接技术的可靠性一直是关注的焦点。

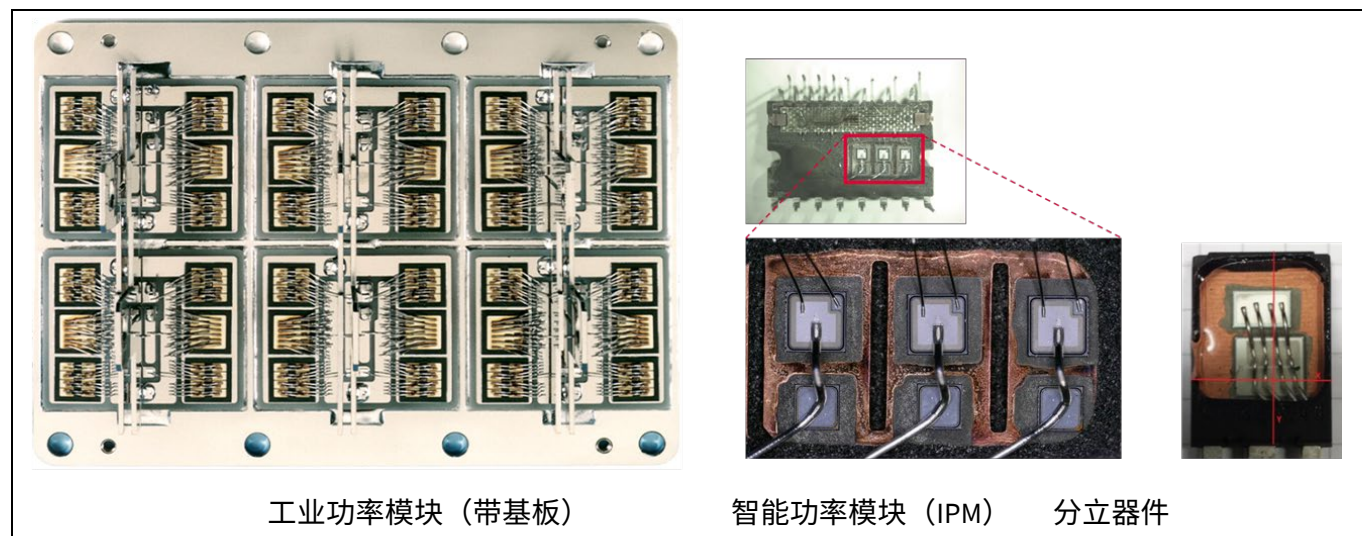


图 1. 带基板的工业功率模块、智能功率模块（IPM）和 co-pack 封装 IGBT 分立器件内部图示（典型外观）

在加速功率循环测试、失效机制分析、键合技术和芯片焊接技术等方面，已经进行了大量改进优化工作，其中包括绑定线材料成分、键合工具形状、绑定过程参数、芯片金属化层以及模塑化合物的优化，如扩散焊和烧结等改良的芯片焊接工艺的引入，都显著提高了功率半导体器件的可靠性和使用寿命。

功率循环在秒级的时间尺度内，使芯片结温度升高和降低。它主要对硅芯片上的绑定线和硅芯片下的焊点施加应力。功率半导体器件的功率循环能力取决于绝对结温 T_{vj} 、温度变化值 ΔT_{vj} 、一个周期持续时间 t_{cyc} 以及一个周期导通时间 t_{on} 。通常，在功率循环测试中，会重复相同的条件，例如负载电流和最大结温 T_{vjmax} 。

对于像 IPM 这样没有开通时间 t_{on} 功率循环 曲线的产品，为简化起见，可以省略与时间相关的 PC 影响。

2.1 关键定义和术语

T_{vj} 的定义

结温 T_{vj} 是半导体 PN 结的温度。由于结温只能间接测量或计算来确定，因此被称为“虚拟结温”。

半导体器件功率循环和热循环计算简介

功率循环

$T_{vj,max}$ 的定义

最高结温 $T_{vj,max}$ 是器件在功率循环图中温度周期内允许达到的最高值。最高结温 $T_{vj,max}$ 越高，器件的应力就越大，循环次数便会减少。

$T_{vj,mean}$ 的定义

平均结温 $T_{vj,mean}$ 是功率循环测试中最小和最大 T_{vj} 的算术平均值，即 $T_{vj,mean} = 0.5 * (T_{vj,min} + T_{vj,max})$ 。

t_{off} 的定义

时间 t_{off} 为无负载时间。通过调节，使温度 T_j 下降到达到所需的 ΔT_j 所需水平。典型的 t_{off} 时间与开通/加热时间 t_{on} 在同一范围内。

t_{on} 的定义

开通时间 t_{on} 是指器件发生功率损耗，导致温度 T_{vj} 稳定上升的时间，例如在电机驱动的加速阶段。开通时间越长，温升就越高，器件相应的应力也就越大，从而导致使用寿命内的循环次数减少。这可以用材料塑性变形能量来解释，因为材料层在较长的开通时间内经历了热机械循环。例如，对于工业功率模块，短周期功率循环 PCsec 测试的典型 t_{on} 为 1.5 秒。

循环周期 t_{cyc} 的定义

时间 t_{cyc} 是指一个功率循环周期的时间，也就是开通时间 t_{on} + 关断时间 t_{off} 。对于工业功率模块，PCsec 测试的典型 t_{cyc} 时间为 3 秒。

下图 2 是一个功率循环曲线示例。它显示了功率器件使用寿命期间在上述焊接触点可达到的应力与温度波动的关系。结温作为衡量标准，既可以在实验室条件下测量，也可以在实际应用条件下模拟。

半导体器件功率循环和热循环计算简介

功率循环

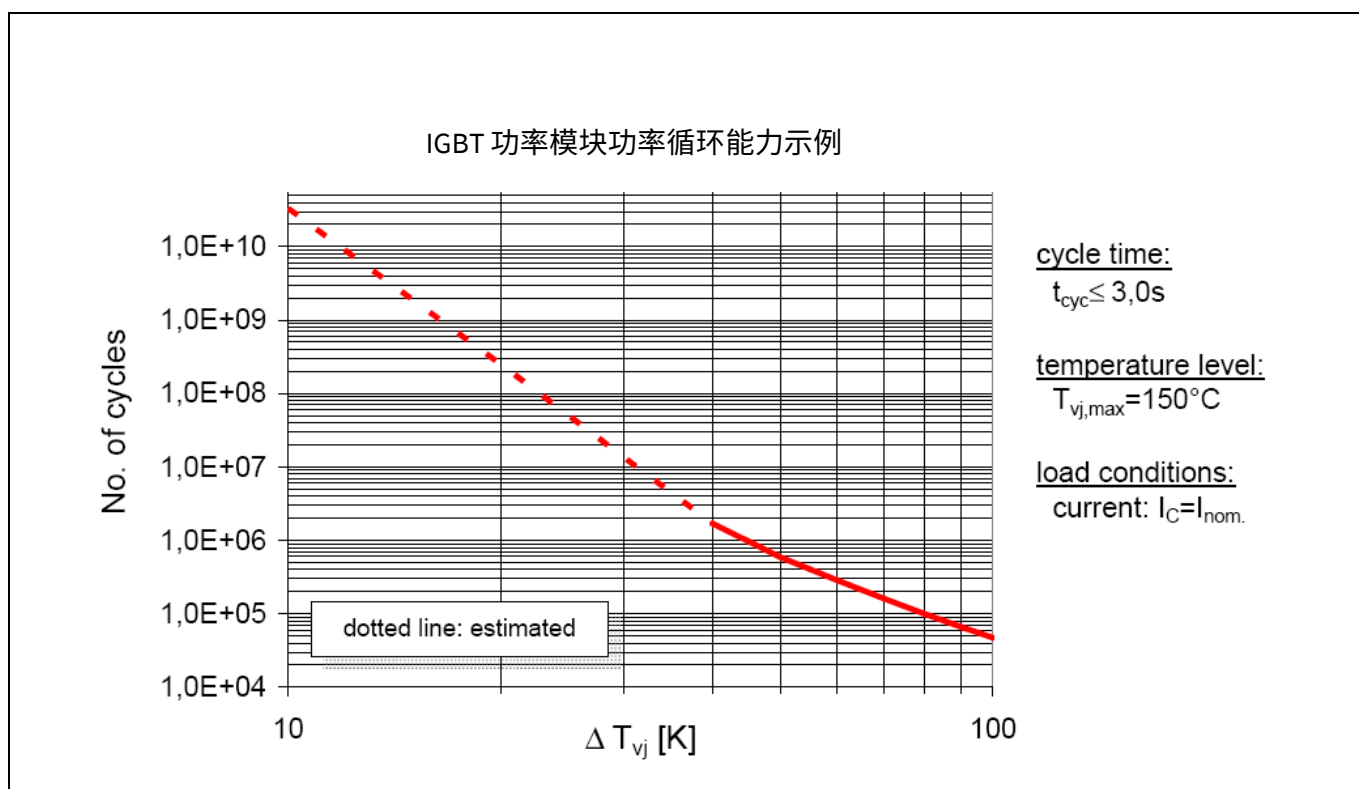


图 2. 该示意图举例说明了在最高结温下的功率循环应力的循环次数与结温变化的关系

要正确解读不同制造商提供的此类曲线图，必须了解其测试条件。

标称电流 I_{nom} 的定义

在分立器件中，流经器件的电流对其功率循环测试产生显著影响。因此，我们提供了一个额外的功率循环图，该图在额定电流 I_{nom} 的条件下得到。额定电流（标称电流）是指在循环测试中开通阶段 t_{on} 通过器件的电流值。

此外，额定电流与器件设计所选择特征电流一致。它可作为数据表中指定主要电气参数的基准，如 IGBT 器件的饱和电压 V_{CEsat} 和安全工作区（SOA）以及 MOSFET 器件的导通电阻 $R_{DS(on)}$ 。通常情况下，对于 IGBT 器件，其额定电流值会包含在产品名称中，并在数据表中规定为 $T_C = 100^{\circ}C$ 时的通过集电极的直流电流。

请注意，对于 co-pack 封装的 IGBT 分立器件（如图 1 所示 IGBT 芯片和二极管芯片封装在一起），额定电流 I_{nom} 与 IGBT 保持一致，不管二极管的电流是多大。

为了找到相应的功率循环图，应用的额定电流 I_{nom} 等于流经器件的有效值电流。

半导体器件功率循环和热循环计算简介

功率循环

失效标准是什么？

英飞凌以热阻 R_{th} 增加 20% 或导通电压增加 5% 作为失效指标。基于这一标准“失效”器件的参数仍在数据表的限值之内, 其参数与没有测试过的器件典型值比较接近。

该曲线的适用温度范围是多少？

英飞凌展示了“最坏情况”（即在最极端的工作条件下）的性能曲线。这些曲线是基于一个假设，即每次温度的周期性波动都会达到允许的最大半导体结温 T_{jmax} 。

失效率是多少？

失效率是指器件在现场应用中根据上文提到的标准出现任何故障的概率。通常情况下，英飞凌在确定功率循环（PC）曲线时会采用 5% 的失效率。然而，就分立器件而言，会发布显示 1%、5% 和 10% 失效概率的 PC 曲线。

哪个周期时间与 PC 相关？

针对工业功率模块，相关的工作周期，英飞凌的测试是基于 $t_{on} + t_{off} = 3s$ 。英飞凌的研究涵盖了从 0.1s ... 60s 的所有 t_{on} 时间。关于工作周期，如图 3 为典型曲线。以此类推，0.1s 至 60s 区间的极限值降额系数也适用于 t_{cyc} 延伸至该工作周期之外的情况。对于较短的周期，该方法则相对保守；对于更长的周期，这种近似是基于当时间 $t > 60$ 秒时塑性变形趋于饱和的假设。

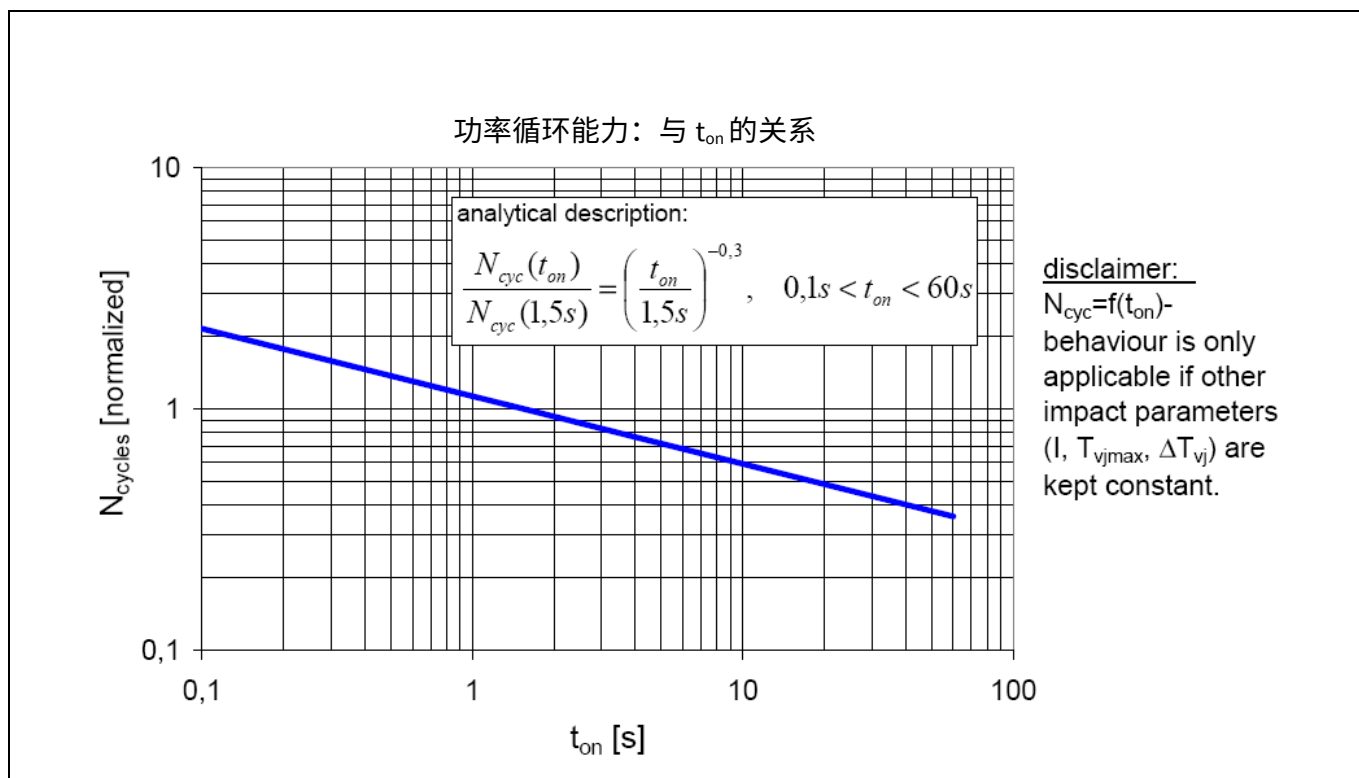


图 3. IGBT4 工业功率模块的循环能力与导通时间 t_{on} 的典型关系

半导体器件功率循环和热循环计算简介

功率循环

友商的功率循环测试曲线可能显示更高的循环次数，但未说明测试条件和采用的失效标准。因此无法进行直接比较。“改善”测试结果和相应可靠性示意图包括：

将失效判定标准提升至真实故障水平

显示故障率较高的框图

对 T_{jmax} 使用较低的温度

测试单个芯片而不是整个模块，以避免多芯片模块中不可避免的不均匀性

采用控制损耗或加热时间 t_{on} 以保持温度变化 ΔT_j 恒定的测试策略，而在实际应用中，损耗和 t_{on} 保持不变，而 ΔT_j 因热阻 R_{th} 的退化而上升

通过减小开关损耗，从而减少焊接连接处的应力。因此，在相同的时间，较低负载电流产生的损耗（温度波动），从而降低对绑定连接的应力

半导体器件功率循环和热循环计算简介

功率循环

2.2 应用示例

以下示例说明了如何在典型应用条件下，使用功率循环曲线来定义器件的功率循环次数。每个示例中用于查找功率循环能力的方法适用于所讨论的任何产品，即工业功率模块、IPM 和分立器件。

示例1:

在电机驱动逆变器中使用了工业类模块，该模块间歇工作，开通时间为 10 秒，周期时间为 60 秒。负载运行中IGBT 温度从85度变化到125度。这意味着结温波动 $\Delta T_{vj}=40\text{ K}$ 。

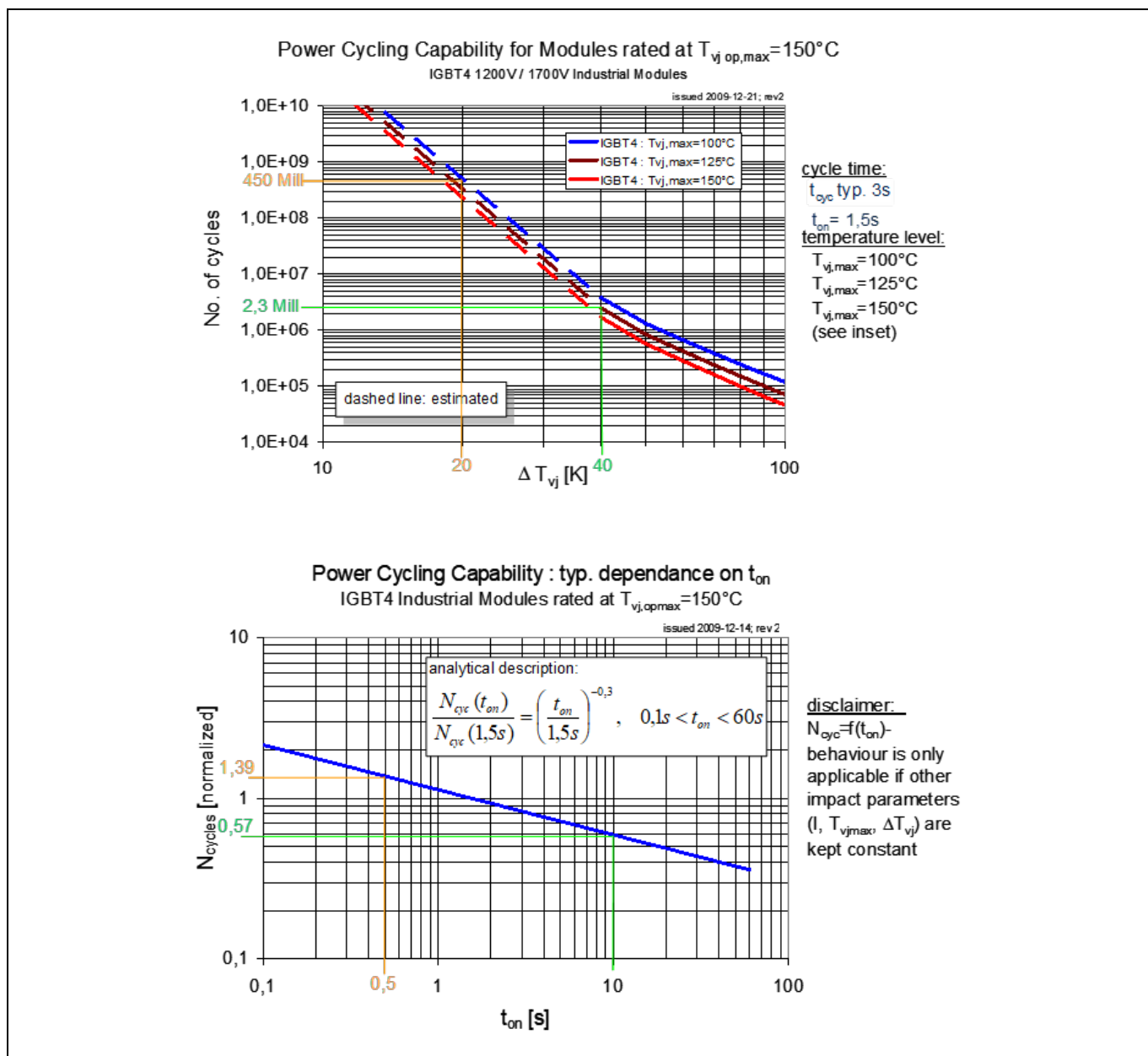


图 4. IGBT 4 工业用功率模块可靠性规范示例

半导体器件功率循环和热循环计算简介

功率循环

从第一张图中可以看出，在 $\Delta T_{vj}=40\text{ K}$ 和 $T_{vjmax}=125^{\circ}\text{C}$ 时，循环次数为230万。由于开通时间 $t_{on}=10\text{ s}$ ，该值需要乘以第二个框图中的校正系数0.57。最终实现 130 万次的功率循环寿命。基于这种应用条件，若以 60 s 的循环周期连续运行，预计使用寿命可达 21 600 小时。

示例2：

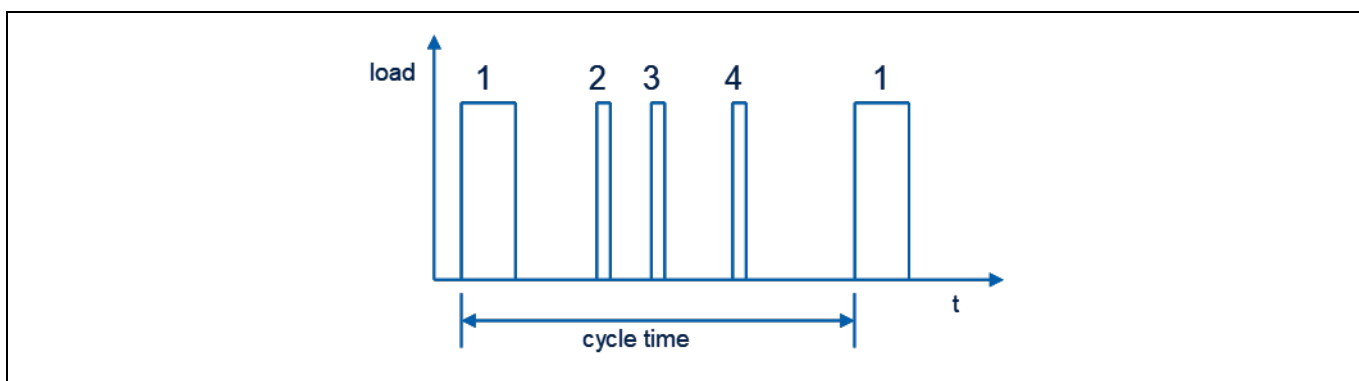


图 5. 具有不同长度脉冲的负载循环示例

前一个示例中使用的同一款工业级功率模块，被应用于间歇性运行电机驱动逆变器中。首次开通时间为 10 s，使 IGBT 的结温从 85°C 上升至 125°C 。接下来的三个开通时间各为 0.5 s，每次都使 IGBT 的结温从 85°C 上升至 105°C 。每个负载周期之间的“关断”时间均超过 2 s。整个负载循环的周期时间为 60 秒。

这导致第一个脉冲的结温波动为 $\Delta T_{vj}=40\text{ K}$ ，接下来 3 个周期的温度波动都为 $\Delta T_{vj}=20\text{ K}$ 。图 4 中上面的曲线显示在 $\Delta T_{vj}=40\text{ K}$ 和 $T_{vjmax}=125^{\circ}\text{C}$ 时寿命是 230 万次。由于导通周期为 $t_{on}=10\text{ s}$ ，该值必须与图 4 下面图中的修正系数 0.57 相乘。因此，使用寿命可达 130 万次的功率循环。

该结果与示例 1 相同。另外还必须考虑更长的负荷期。在 PC 曲线图中， $\Delta T_{vj}=20\text{ K}$ 时有 4.5 亿次循环。负载周期 $t_{on}=0.5\text{ 秒}$ 时，该值必须与修正系数 1.39 相乘。因此，脉冲寿命估计为 6.26 亿。

每个负载脉冲都会消耗寿命。四个脉冲的负载序列可实现的总的循环周期可以使用以下公式来计算：

$$N_{cycle} = \frac{1}{\frac{1}{N_1} + \frac{1}{N_2} + \frac{1}{N_3} + \frac{1}{N_4}}$$

根据上述推导值，估计寿命为

$$N_{cycle} = \frac{1}{\frac{1}{1.3} + \frac{1}{626} + \frac{1}{626} + \frac{1}{626}} = 1.294 \text{ mio cycles}$$

半导体器件功率循环和热循环计算简介

功率循环

在连续运行且周期时间为60 s的情况下，可以预期该应用的寿命为21,560小时。可以看出，总寿命的99.4%被第一个高结温变化负载消耗了，而仅有0.6%的寿命被随后三个结温变化较低的负载周期消耗。

示例3：

额定电流为 50 A 的 IGBT 分立器件 IKQ50N120CH3，在伺服电机驱动逆变器中导通 25 A 交流电流。在运行期间， t_{on} 为 1 s， t_{off} 时间为 9 s，即 10 s 为一个周期。在逆变器工作期间，IGBT 结温从 85°C 升至 125°C。这意味着结温变化为 $\Delta T_{vj} = 40$ K，平均温度 $T_{vj,mean} = 105^\circ\text{C}$ 。

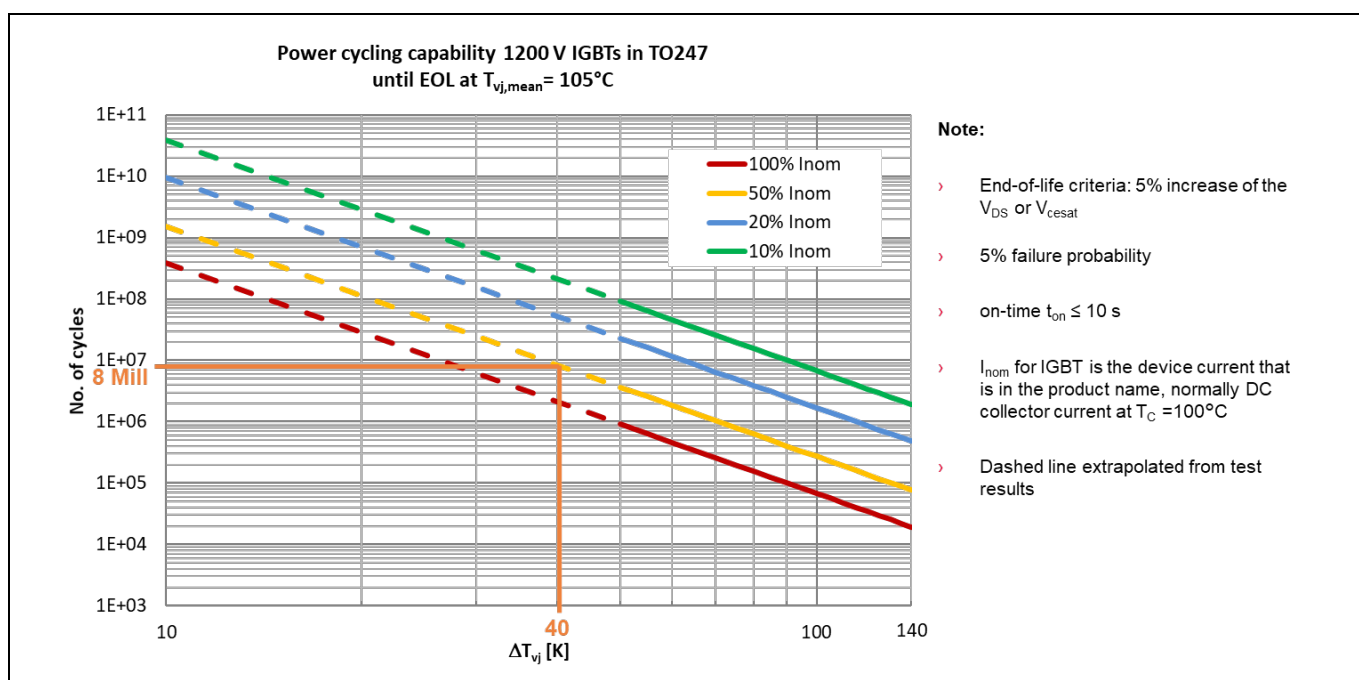


图 6. 使用额定电流 I_{nom} 的分立器件功率循环曲线

首先，查看 IKQ50N120CH3 IGBT [2] 的数据手册和 额定电流 I_{nom} 的定义，确认 $I_{nom} = 50$ A。按照与前面示例相同的过程，并使用 50% I_{nom} 的功率曲线，在 $\Delta T_{vj} = 40$ K 和 $T_{vj,mean} = 105^\circ\text{C}$ 的条件下，功率循环的能力是 800 万次。

3 热循环

众所周知，铜具有易于机械操作和高导热率的优点，因此常用铜作为底板材料。其缺点是热膨胀系数（CTE）与陶瓷基底不匹配。不同材料具有不同的热膨胀系数 CTE 值与热应力因此在焊料时产生机械应力。重复的负载循环会产生焊接裂纹，从而增加芯片与底板之间的热阻。

AlSiC 等硬度相对较高的材料与陶瓷的 CTE 差异较小，可以解决上述问题。此外，双金属效应的减弱还能使散热器的接触面更加平衡。最突出的优势体现在可靠性上，在 $\Delta T_c = 80\text{ K}$ 的加速循环测试中，铜底板和陶瓷之间的焊接层在大约几千次循环后在基板边缘出现严重分层，而采用 AlSiC 底板的模块远远超过了这一数值。

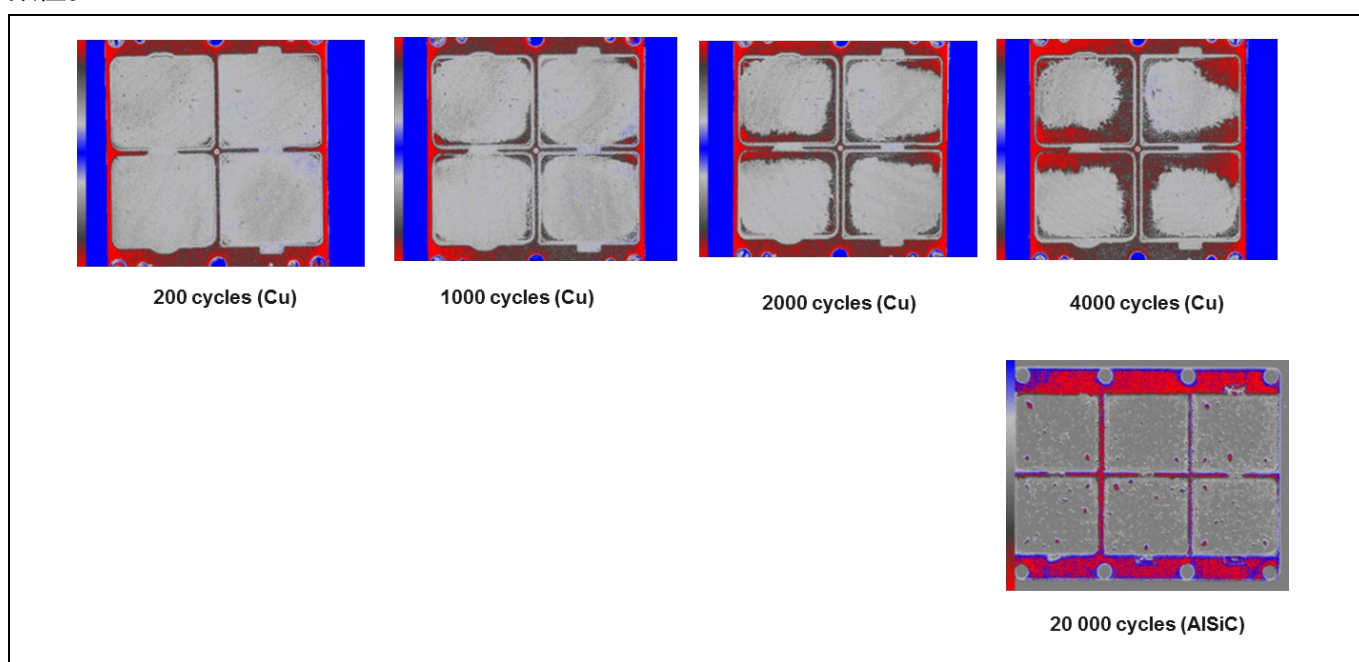


图 7. 带有铜底板（顶部）和 AlSiC 基板（底部）的热循环（TC）比较，使用 AlSiC 基板表现出比较好的热稳定性。

热循环会在数秒的时间内，使壳温在较短时间内升高和降低。热循环主要对 DCB 基板和模块底板之间的焊层施加应力。

图 7 显示了热循环测试后焊层质量示意图，该图提供了上述焊层寿命期间可达到的应力（=温度循环次数）与温度变化的信息。在实验室条件下测量或在应用条件下模拟得到最热芯片对应的壳温。

半导体器件功率循环和热循环计算简介

热循环

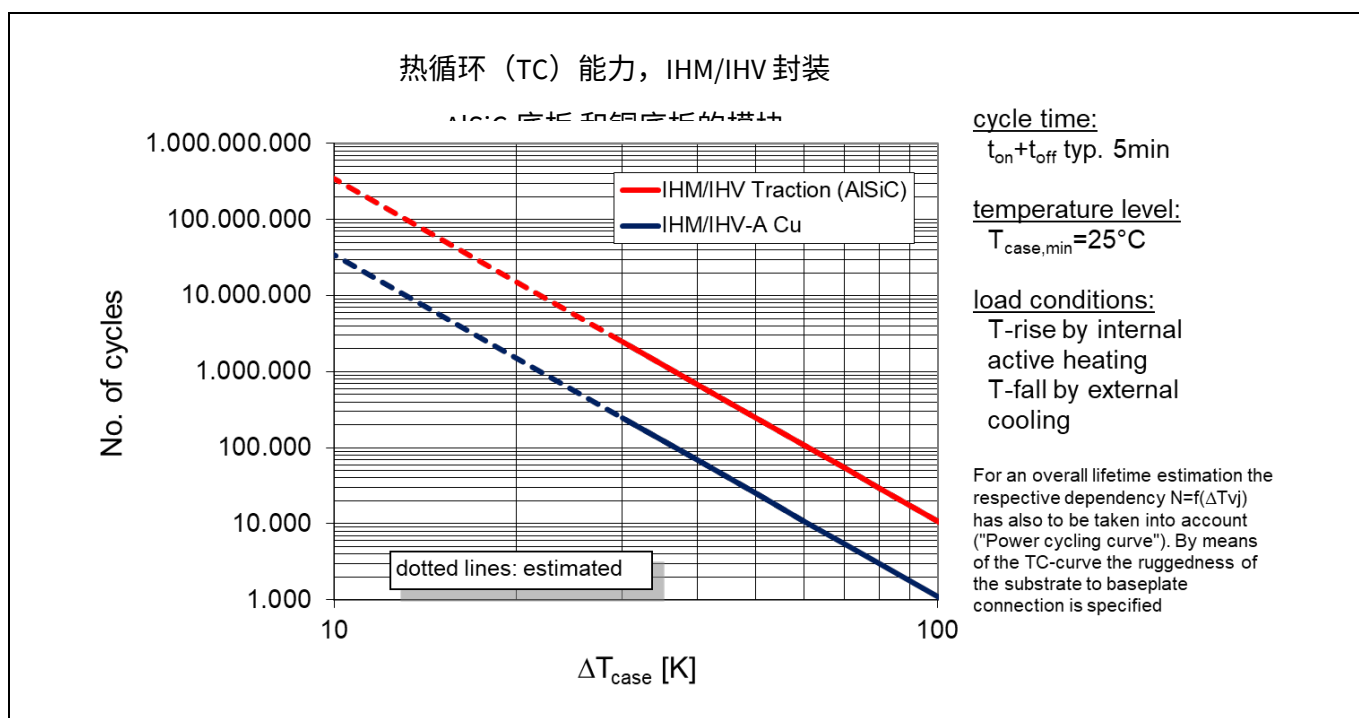


图 8. 带铜底板的工业模块和带 AlSiC 底板的牵引级模块热循环曲线

其他带有铜底板的模块类型（如 PrimePACK™ 或 EconoPACK™）其相应曲线也可提供。

例如，在 $\Delta T_c = 80$ K 温度波动条件下，带铜底板的 IHM-A 器件可承受 3,000 次循环，而相应的 AlSiC 器件则可承受 30,000 次循环。

再次强调，在判断或比较这些曲线图时，了解它们的测试条件是非常重要的。

对于温度循环 TC 而言，相关的**循环时间**一般为分钟级。在短短几秒钟内的温度波动不会影响与系统焊接相关的失效，因此在此考虑中可以忽略。

温度循环 TC 曲线不适用于 IPM 产品；进行寿命计算时，只需参考 PC 曲线。

4 雨流计数算法计算寿命

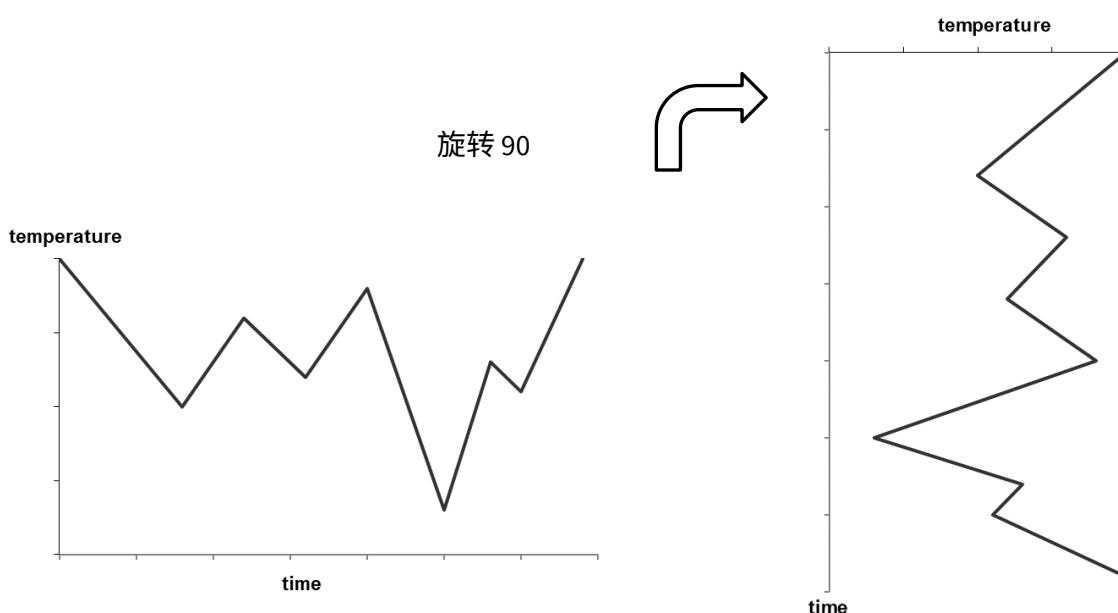
为了确定应用的预期寿命，有必要加权计算结温 $T_{vj}(t)$ 范围内的温度循环次数，以确认功率循环，或加权外壳温度 $T_c(t)$ 范围内的温度循环次数，以确认热循环。

为此，英飞凌提供在线 IPOSIM 工具以便于负载循环计算功能。

对于温度曲线复杂多变的负载循环，可在疲劳数据分析中采用雨流计数算法，以便将变化应力频谱简化为一组简单的循环次数。基于这些数字，再使用前面所述的循环曲线，可轻松计算出疲劳寿命。

雨流算法的方法如下：将时序还原为一系列拉伸峰值和压缩谷值。

为此，将温度循环顺时针旋转 90° ：



每一座峰值都被想象成滴落而下的水源。让“水滴”从每个最大值和最小值开始，并在水滴终止时停止。若“水滴”...

- 始于最小值并到达最大值，该最大值等于或大于之前传递的值
- 始于最小值并经过最小值，该最小值等于或低于起点
- 始于最大值并到达最小值，该最小值等于或低于之前传递的值
- 始于最大值并经过最大值，该最大值等于或高于起点
- 到达另一个落差处 / 与从较早峰值开始的水流汇合
- 到达时序终点或“超时”

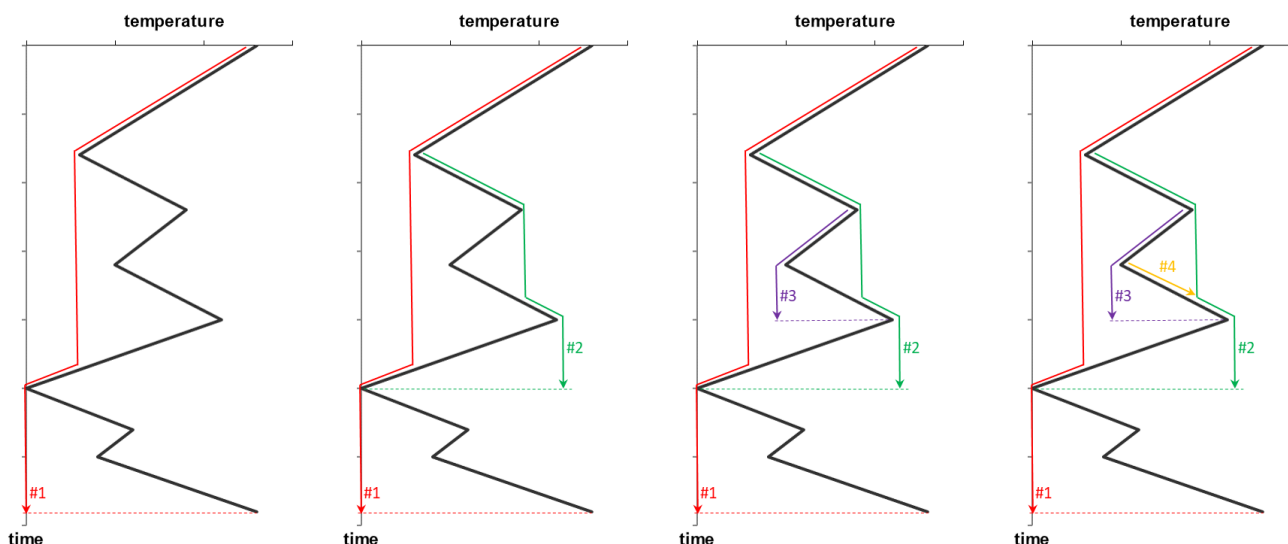
半导体器件功率循环和热循环计算简介

雨流计数算法计算寿命

记录半周期数及其幅度（起始点和终止点之间的差值）。

示例（为简化起见，本例未采用 t_{ON} 曲线）

此例采用雨流法对循环进行分析。

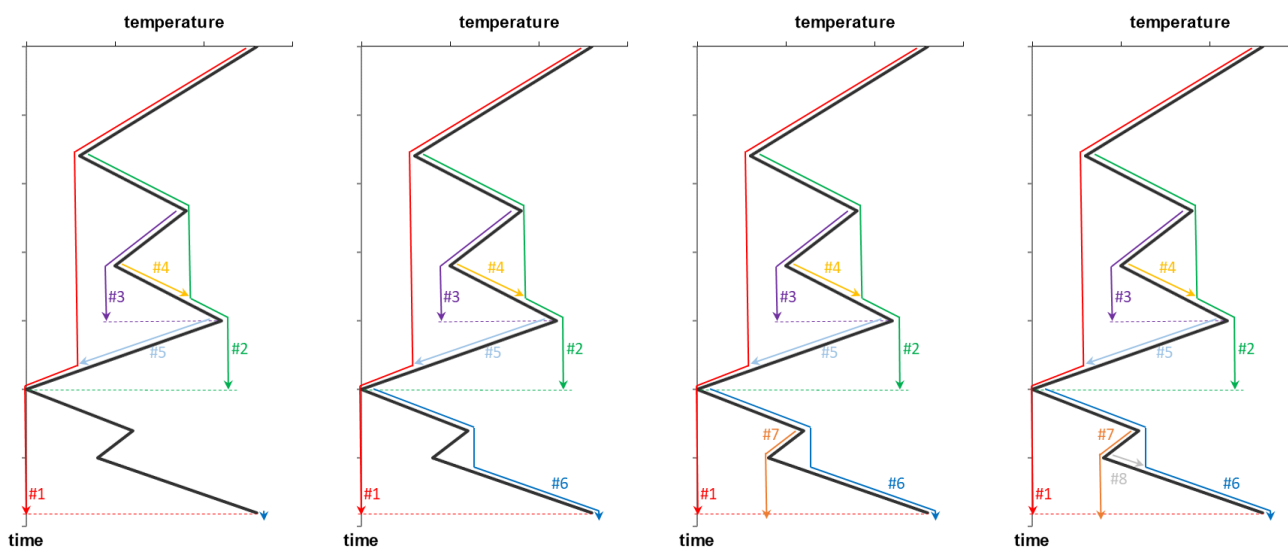


#1 达到最低值，该值低于前一个值

#2 达到最大值，高于前一个最大值

#3 通过一个最大值，该值高于起始点

#4 到达 2 号雨滴运行点



半导体器件功率循环和热循环计算简介

雨流计数算法计算寿命

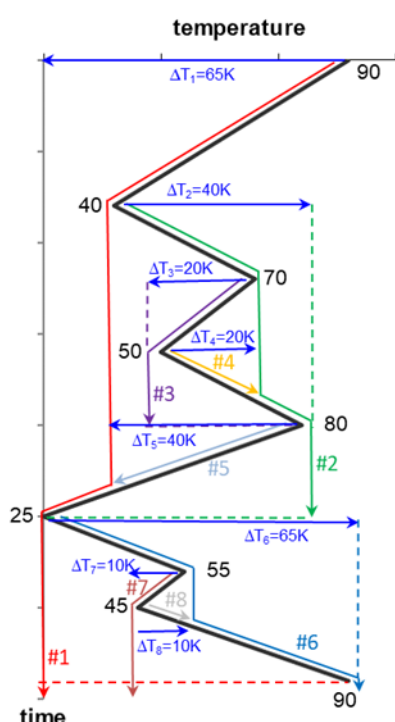
#5 到达 1 号雨滴运行点

#6 “脱落”

#7 “脱落”

#8 到达 6 号雨滴运行点

现在，对幅度相同但方向相反的半个周期进行求和，以此来计算完整周期的数目。



ΔT's 的数量:

2x 65 K

2x 40 K

2x 20 K

2x 10 K

雨滴计数法总会生成成对的相同温度循环。与简单的温度循环计数方法相比，它更强调大的温度波动。

该规则有时也被称为“矿工累积损伤假说”，即如果频谱中有 k 个不同的应力大小，每个应力大小产生 n_i

个循环、那么，如果 N_i 是常数应力失效的循环次数，则当 $\sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = C$ 发生失效时，假定 C 为 1。

在实际操作中，通常是通过循环框图计算每一对温度上下波动 ΔT 的寿命消耗量，然后将各个结果相加。

前面分析过的负载循环在使用寿命是 25 000 次。

图 7 中的热循环框图显示的是温差 65 K 时寿命为 75,000 次，或在温差为 40 K 时寿命为 650,000 次。

按 65 K 计算，寿命消耗为 $25,000/75,000 = 33.3\%$ ，按 40 K 计算，寿命消耗量为 $25,000/650,000 = 3.8\%$ 。

综上所述，被研究的负载循环会消耗总可用寿命的 37%。温差为 20 K 和 10 K 的影响可忽略不计。

5 参考文献

- [1] AN2010-02 IGBT4 电源循环曲线的使用 (Use of Power Cycling Curves for IGBT4)
- [2] IKQ50N120CH3 IGBT 数据表 (IKQ50N120CH3 IGBT data sheet) ,
https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IKQ50N120CH3-Data sheet-v02_04-EN.pdf?fileId=5546d4625bd71aa0015bd817b0150536
- [3] K.Mainka, M. Thoben, O.Schilling: „功率模块的寿命计算，模型和计数方法的应用和理论 (Lifetime calculation for power modules, application and theory of models and counting methods) “。EPE 2011

文档修订记录

自上次修订以来的主要变更内容

页码或参考	变更说明
第 1、2 章	新增智能电源模块 (IPM) 和分立器件

上述功率循环框图是基于英飞凌当前的测试和仿真结果，或与在功率循环领域高度专业的外部合作伙伴共同进行的测试所推算出的。此类信息仅供作为使用英飞凌相关产品的指南。由于实际的操作条件 and 环境因素可能有所不同，因此产品寿命的计算和估计应由英飞凌的客户来验证。因此，英飞凌不承担基于这些循环框图所做寿命计算或估计的正确性的责任。请注意，英飞凌产品的技术规格应以相应的英飞凌数据表为准。如需更多信息，请联系您的英飞凌产品销售代表。

Trademarks
All referenced product or service names and trademarks are the property of their respective owners.

Edition 2024-07-23
Published by
Infineon Technologies AG
81726 Munich, Germany

© 2024 Infineon Technologies AG.
All Rights Reserved.

Do you have a question about this document?

Email: erratum@infineon.com

Document reference
AN2019-05_ZH

重要提示
本文档所提供的任何信息绝不当被视为针对任何条件或者品质而做出的保证（质量保证）。英飞凌对于本文档中所提及的任何事例、提示或者任何特定数值及/或任何关于产品应用方面的信息均在此明确声明其不承担任何保证或者责任，包括但不限于其不侵犯任何第三方知识产权的保证均在此排除。此外，本文档所提供的任何信息均取决于客户履行本文档所载明的义务和客户遵守适用于客户产品以及与客户对于英飞凌产品的应用所相关的任何法律要求、规范和标准。

本文档所含的数据仅供经过专业技术培训的人员使用。客户自身的技术部门有义务对于产品是否适宜于其预期的应用和针对该等应用而言本文档中所提供的信息是否充分自行予以评估。

如需产品、技术、交付条款和条件以及价格等进一步信息，请向离您最近的英飞凌科技办公室接洽(www.infineon.com)。

警告事项
由于技术所需产品可能含有危险物质。如需了解该等物质的类型，请向离您最近的英飞凌科技办公室接洽。

除非由经英飞凌科技授权代表签署的书面文件中做出另行明确批准的情况外，英飞凌科技的产品不当被用于任何一项一旦产品失效或者产品使用的后果可被合理地预料到可能导致人身伤害的任何应用领域。