

芯片可以薄至 $70\mu\text{m}$ 。在功率器件中，芯片会受到来自键合线、焊料层和基板的热应力，功率器件芯片越薄，由芯片材料硅引起的焊接界面的机械应力会相应减小，寿命会相应增加。此外，芯片厚度与芯片表面温度梯度也有关系，芯片越薄，表面温度梯度越小，寿命会相应增加。

键合线直径对可靠性的影响在 8.3.1.4 节中已经详细介绍过，此处不再赘述。主要是键合线直径与键合界面面积相关，而键合界面面积与应力-应变相关，较小的直径有助于提高寿命，但前提是需要保证足够的通流容量。

8.5.4 寿命预测技术

功率器件作为开关应用于变流器、逆变器等装置中，由于在服役中存在不断的开关过程，开关损耗和导通损耗以及外部环境温度的变化造成器件内部存在结温波动。前述提及，

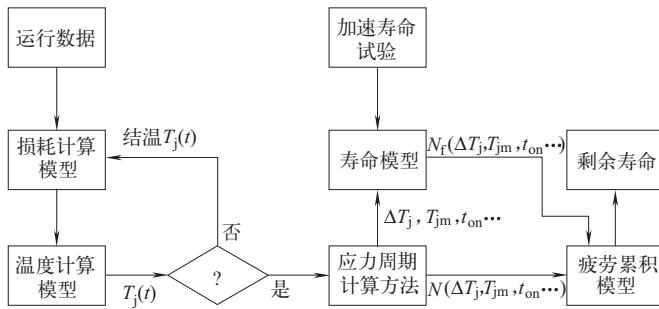


图 8-132 寿命预测基本流程

结温波动是影响功率器件寿命最重要的因素。在较高的结温波动下，功率器件往往要承受较大的热应力，热应力引起铝键合线以及焊料塑性应变的不断累积，最终导致功率器件热疲劳失效。对服役中的功率器件进行剩余寿命预测并在器件失效前进行更换，能够有效减小器件突然失效带来的成本损失，提高变流器、逆变器等装置的运行稳定性。除了对服役过程中的功率器件开展寿命预测，设计工程师也可以利用寿命预测技术来预估新器件在某一运行工况下的寿命，以此来评估新器件是否满足运行条件下的寿命要求。寿命预测的基本流程如图 8-132 所示，主要分为三个步骤：结温计算、寿命模型建立、工况下的寿命计算。

① 结温计算：这一步的目的是获取某一运行周期下的结温波动情况，为后面寿命预测做准备，通常又分为损耗计算和热网络模型下结温计算，有时也采用有限元仿真的方法获得。首先根据给定的一个循环周期下的功率器件运行数据，这些数据通常包括相电流幅值 I_m 、直流侧电压 V_{DC} 、频率 f_s 、功率因数角 $\cos\varphi$ 、调制比 m ，同时还要考虑器件的结温对损耗计算影响。结合功率器件的静态特性曲线，文献 [50] 给出了 IGBT 导通损耗和开关损耗的近似计算公式，如式 (8-50)~式 (8-52) 所示：

$$LC = \sum_i^k \frac{N_i}{N'_i} = \frac{N_1}{N'_1} + \frac{N_2}{N'_2} + \frac{N_3}{N'_3} + \dots + \frac{N_k}{N'_k} \quad (8-50)$$

$$P_{DC} = \frac{I_m^2 r}{8} + \frac{I_m^2 V_{CE0}}{2\pi} + m \left(\frac{I_m^2 r}{3\pi} + \frac{I_m^2 V_{CE0}}{8} \right) \cos\varphi \quad (8-51)$$

$$P_{SW} = \frac{1}{\pi} f_s [E_{on_nom}(I_{nom}, V_{nom}) + E_{off_nom}(I_{nom}, V_{nom})] \frac{i}{I_{nom}} \times \frac{V_{DC}}{V_{nom}} \quad (8-52)$$

式中， r 为等效通态电阻； V_{CE0} 为 TCP 点电压值； E_{on_nom} 、 E_{off_nom} 为在标称电压 V_{nom} 和标称电流 I_{nom} 下测试得到的开通和关断损耗。通过上述公式可近似计算得到某一个

运行周期内 IGBT 芯片的功率损耗变化，如图 8-133 显示了某 IGBT 在一个运行周期损耗示意图。

通过热网络模型来计算结温也是最重要和最关键的一步，Cauer 热网络模型和 Foster 热网络模型可以参考第 4 章的图 4-6，是最常用的两种热路比拟模型。Cauer 热网络模型中每一层材料通过一对热阻和热容替代，每个节点直接连接到地电位，当芯片产生功率损耗时，每个节点的电压即节点温度都将升高，热能储存在热容中。因此 Cauer 热网络模型能正确反映传热的过程，通过计算每个节点电压就能获取该层材料的温度变化情况。Cauer 热网络模型也更适合用在状态监测上，因为 Cauer 热网络模型参数能真实反映器件内每一层的健康状态。Foster 热网络模型相对于 Cauer 热网络模型更易获取，具有结构简单特点，但它不能反映系统实际的传热过程。通常可以通过试验或者数据表上的瞬态热阻抗曲线通过拟合得到热网络参数，一般进行四阶拟合精度就足够。Foster 热网络模型虽然不能获得每层材料的温度信息，但其参数容易获取，广泛应用于结温计算。当获取 Foster 网络模型热参数后，通过 Spice、Saber 等电路仿真带入单个运行周期的损耗变化以及环境温度变化，可得到结温变化。

除了通过热网络模型计算结温，也可以通过热响应解析式计算结温。当获取单个芯片的瞬态热阻抗曲线后，瞬态热阻抗曲线可以表示为式（8-53）所示的解析式：

$$Z_{\text{th}} = R_{\text{th}}(t) = \sum_{i=1}^n R'_i \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}} \right) \quad (8-53)$$

式中， $\tau_i = R'_i C'_i$ ，Foster 热网络模型参数即是该解析式中 R'_i 和 C'_i 。通过式（8-54）可以计算出单个运行周期下的结温变化。

$$T_j = P_{\text{loss}} Z_{\text{th}} + T_a = f(T_j, I_m, V_{\text{DC}}, m, \cos\varphi, f_s) \sum_{i=1}^n R'_i \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}} \right) + T_a \quad (8-54)$$

② 寿命模型建立或选择：这一步的目的是通过建立器件的寿命模型来外推实际工况下的寿命。当然能够进行外推的前提是进行加速老化后器件的失效机理和失效模式不能发生改变，必须与实际工况一样。寿命模型的建立有两种：一种是经验寿命模型，需要通过大量的功率循环测试矩阵来获得；另一种是物理寿命模型，可以通过仿真来得到，但仿真模型需要先进行校准。关于经验寿命模型和物理寿命模型在 8.5.1 节和 8.5.2 节有详细的介绍，这里不再赘述。进一步地，如果所选用的功率器件为标准封装，也可直接引用现有的寿命模型，如 8.5.1 节所展示的各类经验寿命模型。

③ 工况下的寿命预测：这一步的核心是基于线性累积损伤定律（Mine 定律）。当获取一个运行周期下的结温变化后，基于雨流算法对器件的结温变化进行分类，如图 8-134 所示。通常雨流算法会统计出结温波动在各个标定范围内的出现的次数 N_1 、 N_2 、 N_3 ……一般认为标定范围内的结温波动产生的应力相同。同时将分类的结温波动代入寿命模型中计算得到在该结温波动下器件的寿命 N'_1 、 N'_2 、 N'_3 ……基于累积损伤定律，器件在该工况周期

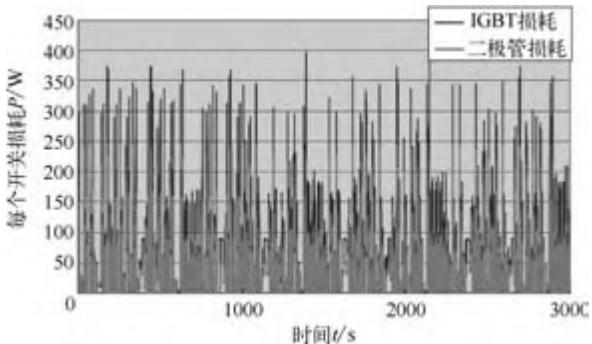
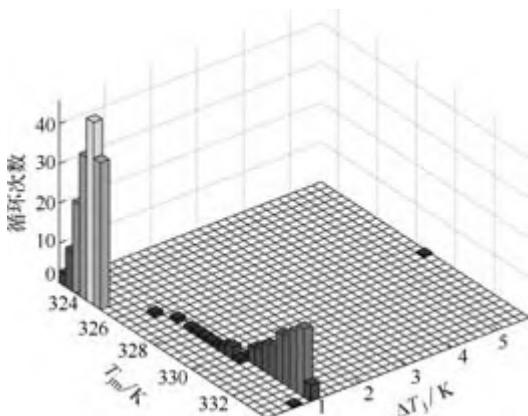


图 8-133 某个运行周期内损耗变化情况^[50]

图 8-134 雨流算法对结温波动分类^[50]

有限元仿真方法获得 IGBT 模块中 IGBT 芯片与 FRD 芯片的周期性的结温曲线，再通过雨流算法获得其结温波动、平均结温与次数的矩阵，基于最为经典的 CIPS08 寿命模型进行寿命的计算，再通过累积损伤定律进行损伤的评估，最终输出功率器件在指定周期性运行工况条件下的剩余寿命。考虑到数据保密要求，这里只展示寿命的百分比，如图 8-136 所示。从 3300V/1500A 焊接式 IGBT 模块内部芯片层面来考虑，最严苛的情况下，IGBT 芯片的寿命与 FRD 芯片差异达到了 96% 左右，成为最薄弱的环节，对应于子单元中的上桥 IGBT 模块；而子单元中的下桥 IGBT 模块中 FRD 芯片的应用条件比较严苛，寿命与 IGBT 芯片的差异为 32% 左右。从这里可以看到，同样的功率器件和封装结构，在不同的位置所承受的电气应力不一样，导致器件内部芯片的寿命也是有差异的，所以实际应用时需要重点关注不同位置和应用工况对器件的寿命影响。从功率模块及子模块层面来考虑，MMC 的上下桥臂的寿命是几乎一样的，完全对称结构，但子单元中仍然是下桥臂的 IGBT 模块应用条件最为严苛，与上桥臂 IGBT 模块寿命差异可达 74% 左右，成为需要重点关注的对象。单纯从功率器件的封装可靠性层面和成本层面来考虑，子单元中的下桥臂可以用高电流等级和可靠性的模块，而上桥臂采用电流等级稍低的模块，通过“削峰填谷”来实现整体寿命的提升，这可能是未来实现应用可靠性提升的手段之一。

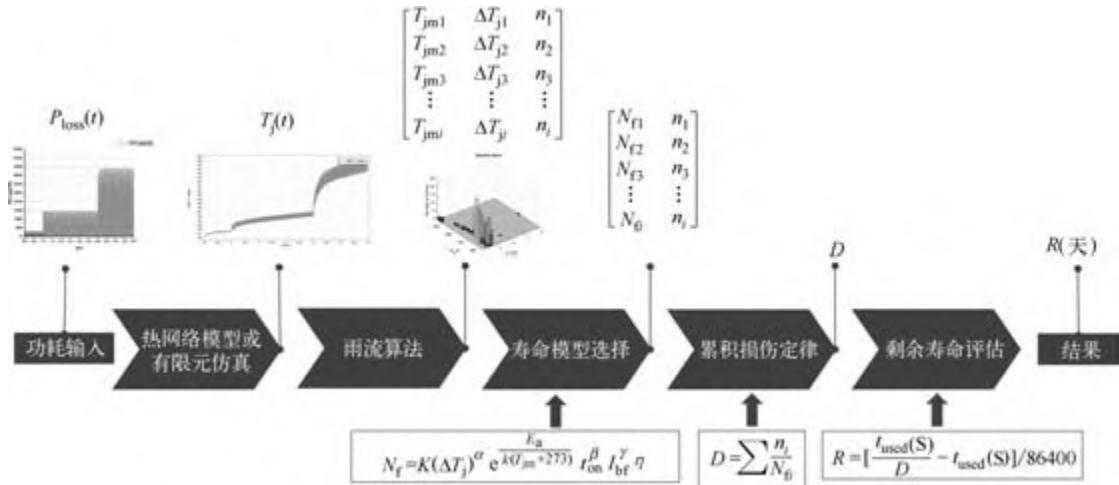


图 8-135 某 3300V/1500A 焊接式 IGBT 模块在实际应用的寿命预测流程

下的寿命计算如式 (8-55)、式 (8-56) 所示：

$$N_f = \frac{1}{LC} \quad (8-55)$$

$$LC = \sum_i^k \frac{N_i}{N'_i} = \frac{N_1}{N'_1} + \frac{N_2}{N'_2} + \frac{N_3}{N'_3} + \dots + \frac{N_k}{N'_k} \quad (8-56)$$

下面以欧洲某柔性直流输电工程使用的 3300V/1500A 焊接式 IGBT 模块为例，介绍剩余寿命的预测过程。实际的流程如图 8-135，基于 PSCAD 仿真软件获得 1 个桥臂中 1 个子单元的 IGBT 模块的功率曲线，然后采用

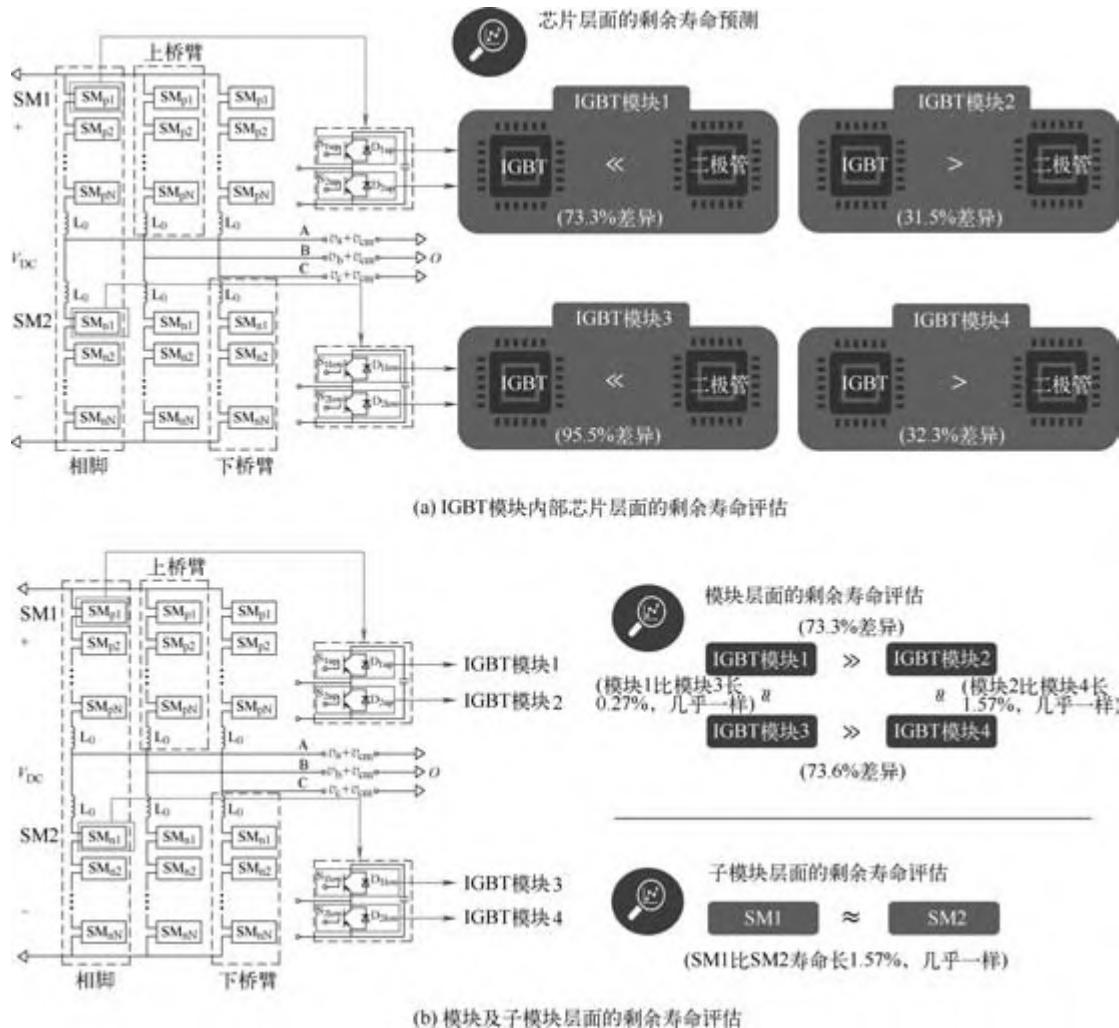


图 8-136 某柔性直流工程中所采用的 3300V/1500A 功率器件的剩余寿命评估

8.6 数理统计理论

可靠性理论及功率器件的浴盆曲线在 6.1 节中已经介绍。器件早期失效阶段中最常出现的概率分布是威布尔分布、伽马分布和指数分布；随机失效阶段的特点是失效率较低且较稳定，往往可近似看作常数。产品可靠性指标所描述的就是这个时期，这一时期是产品的良好使用阶段。随机失效主要是质量缺陷、材料弱点、环境和使用不当等因素引起的。随机失效阶段的概率分布为指数分布和威布尔分布；老化失效阶段通常是失效率随时间的延长而急速增加，主要由产品的磨损、疲劳、老化和耗损等原因造成。老化失效阶段的概率分布一般遵循正态分布或威布尔分布。因此，要计算可靠性测试所需的样本数量，失效率所服从的概率分布函数是影响数量确定的一个重要因素。指数分布常用来计算样本故障率恒定的情况，威布尔分布的样本故障率是随时间变化的，并且当威布尔分布的形变参数 $\beta=1$ 时（也就是随机失效），威布尔分布就变成了指数分布。