

## 第3章

# 基于失效物理方法的 PHM

Shunfeng Cheng<sup>1</sup>, Nagarajan Raghavan<sup>2</sup>, Jie Gu<sup>3</sup>, Sony Mathew<sup>4</sup>, Michael G. Pecht<sup>5</sup>

1 美国西斯波罗或英特尔公司

2 新加坡科技设计大学 (SUTD), 工程产品开发 (EPD) 部

3 美国乔治亚州旧金山湾区, 苹果公司

4 美国德克萨斯州丹顿斯伦贝茨

5 美国马里兰大学帕克分校高等寿命周期工程中心

失效物理 (PoF) 是利用产品寿命周期载荷和失效机理知识评估产品可靠性的。失效物理方法建立在设备、产品或系统的潜在失效机理和失效位置的识别上。失效机理采用动力学因子 (如通量、通量散度、缺陷产生率) 与作用在系统潜在失效位置处的应力 (驱动力, 如电压、电场、温度等) 的关系进行描述。该方法论可为评估新材料、新结构或新产品的可靠性建立一个科学的基础, 从而富有前瞻性地实现可靠性评估。

基于失效物理的方法可以在其实际应用条件下评估和预测系统可靠性。它将传感器数据与模型集成在一起, 这些模型能够实时识别产品的当前状态与预期正常运行条件 (即产品的“健康状态”) 之间的偏离或退化程度, 并预测产品未来的退化状态。本章概述了故障预测与健康管理 (PHM) 的失效物理预测方法。

### 3.1 基于失效物理的 PHM 方法论

通用的基于失效物理的 PHM 方法论如图 3.1 所示<sup>[1]</sup>。在工业界、美国政府和其他合作大学的支持下, 马里兰大学高级寿命周期工程中心 (CALCE) 创建了失效物理方法论并开发了软件。

该方法论的第一步是失效模式、机理及影响分析 (FMMEA), 其中设计数据、预估寿命周期条件和失效物理模型是评估的输入。然后, 确定潜在的失效部位及其失效模式、失效原因和失效机理。基于发生的可能性、危害性和可检测性, FMMEA 可以确定关键失效模式和失效机理的优先级。根据失效机理和失效模型选择合适的参数进行状态监测和 PHM。根据收集到的工作和环境数据, 分析失效部位的应力水平, 并将其作为失效模型的输入评估产品的健康状况和累积退化量, 计算并获得剩余使用寿命 (RUL)。

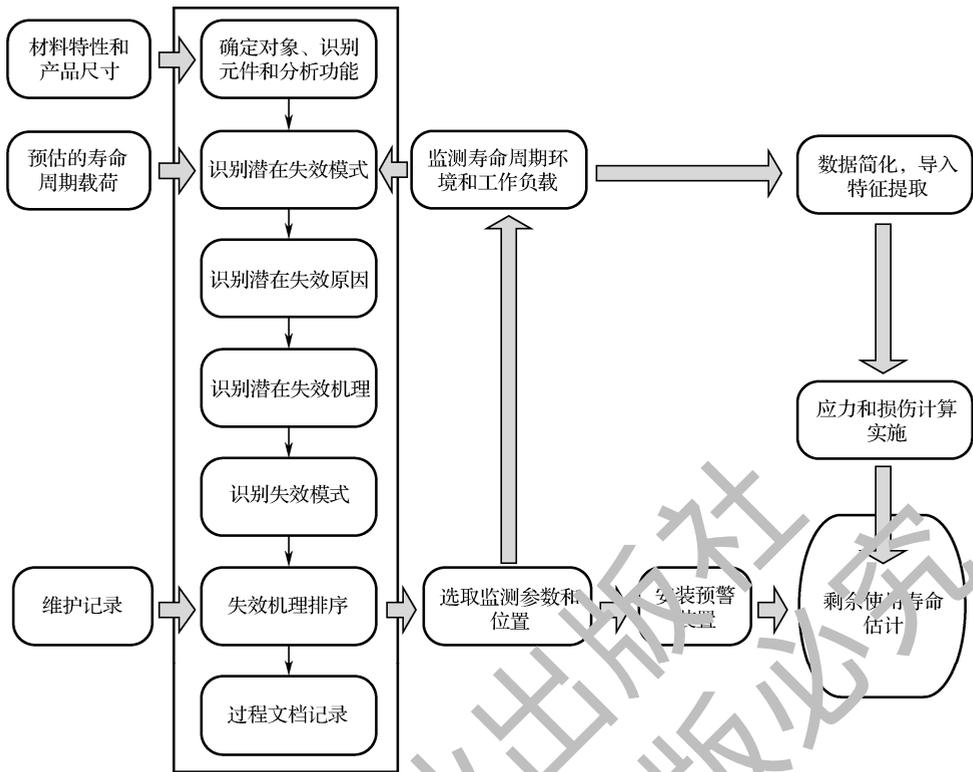


图 3.1 基于 F-F 的 PHM 方法论<sup>[1]</sup>

### 3.2 硬件架构

为了实现可靠性评估，该方法论在产品初始阶段就需要某些输入，这些输入包括所有级别上的产品硬件配置（即系统的一部分）、载荷和失效模型。

产品架构是将产品分解（分类）为物理组成部件。复杂产品通常由许多共同工作的部件组成，以确保产品的整体功能。该架构描述了产品的部件，以及每个部件的功能、功能关系和组装关系<sup>[2]</sup>。

此处的讨论已经定义了电子设备的六个诊断级别<sup>[3]</sup>。级别 0 包括芯片和片上结构，如电路和金属化结构。级别 1 包括元件、组件，以及该组件的键合引线、引线框架和密封剂。该级别还包括集成电路和分立元件，如电阻、电容和电感等。级别 2 包括印制电路板和将组件连接至该板上的互连件（引线、焊球等）。该级别还包括印制电路板上的连接部件，如焊盘、镀通孔（PTH）、过孔和金属线。级别 3 包括机柜、机箱、抽屉和板卡连接。该级别包括产品或子系统，如硬盘驱动器、视频卡和电源。级别 4 包括电子产品，如笔记本电脑、外场可更换单元（LRU）或连接件。级别 5 包括电子系统和不同系统之间的外部连接（如从计算机到打印机或 LRU 和座舱显示器的连接）。我们可以将此最后一个级别归类为“系统体系”分析。

除了几何形状外，产品中使用的材料还将影响产品对外部和内部应力的响应。在给定的一组测试/工作条件下，材料特性参数用作基于失效物理的失效模型的输入以计算失效部位和失效机理的失效时间（TTF）。



### 3.3 载荷

评估产品的可靠性，必须考虑载荷，因其决定了产品的使用寿命。产品寿命周期包括制造、组装、存储、搬运、运输以及持续时间最长的现场应用。在寿命周期的每个阶段中，产品承受来自环境的不同类型和大小的载荷，包括温度、气压、湿度、振动、机械应力、化学反应、辐射等。所有这些载荷可能会造成（可检测或不可检测的）损伤累积，从而影响其剩余使用寿命。

产品不可避免地要承受一个或多个环境载荷，包括热载荷（如温度）、机械载荷（如压力）、化学载荷（如腐蚀）、磁载荷（如来自磁场）、辐射载荷（如来自宇宙射线的辐射）等。任何这些环境载荷都会在产品中产生应力，从而影响其性能和功能。在不同的环境条件下，不同类型的载荷可能会成为引入产品的主导应力，而其他载荷的影响可能并不关键，甚至可以忽略不计。例如，在许多情况下，不需要考虑辐射，因为除了在太空飞行期间，辐射水平足够低而可以忽略不计。

由于材料特性或失效安全策略不同，不同产品或组件对载荷的敏感性也可能不同。因此，对于一种产品至关重要的载荷可能在另一种产品中不起作用。例如，将手机掉落在坚硬的地面上所引起的机械冲击可能无法与打开的笔记本电脑掉落所造成的冲击相比。

产品使用过程中会产生工作载荷。这些载荷包括热、机械、化学、磁、电等。例如，在某些工作条件下，产品可能由于电气、机械工作或化学反应而产生热量。由于不同材料的热膨胀系数（CTE）不匹配，温度变化会引起机械应力（拉伸/压缩）。内部温度梯度也可能在同一材料内产生热机械应力。

工作和环境载荷是导致产品失效的驱动力，然而，这些载荷不是一个可以直接嵌入到失效物理模型中简单的输入变量。载荷数据采集后，需要进行应力分析，将载荷转化为用于特定失效物理模型的局部应力条件。

### 3.4 失效模式、机理及影响分析（FMMEA）

FMMEA 是一种系统性方法论，可识别所有潜在失效模式的潜在失效机理和模型，并对这些失效机理进行优先级排序。FMMEA 结合失效物理知识，利用了传统失效模式及影响分析（FMEA）的基本步骤。FMMEA 基于应用条件评估敏感应力并选择潜在的失效机理。结合应力知识与失效模型，根据其危害性和发生的可能性对失效机理进行优先级排序。FMMEA 是 CALCE 开发的，旨在解决传统 FMEA<sup>[4-7]</sup>和失效模式、影响及危害度分析（FMECA）<sup>[8-9]</sup>过程的固有不足。

FMMEA 基于理解产品需求和物理特性之间的关系（及其在生产过程中的变化）、产品材料与载荷的相互作用（由于使用条件引起的应力）以及它们对产品在使用条件下失效的敏感性的影响。涉及确定失效机理和可靠性模型以定量评估失效的敏感性。FMMEA 将敏感应力和潜在失效机理的知识与寿命周期环境、工作条件和预期应用的持续时间相结合。

FMMEA 过程始于定义要分析的系统，该系统被视为子系统或级别的组合，这些子系统或级别集成在一起以实现特定的目标。该系统分为各种子系统或不同级别，一直到最低的级别——组件或元件。每个元件都列出所有关联的功能，该功能列表是必需的，因为失效定义为这些功能的数字/模拟输出的退化。

失效模式是观察到失效发生的效果。它也可以定义为组件，子系统或系统可能无法满足或交付其预期功能的方式。例如，电气失效的开路和短路、机械应力引起的开裂或蠕变失效。每个已

识别元件的所有可能的失效模式都应该列出。可以使用数值应力分析，加速失效测试（如高加速寿命试验，HALT），以往的经验以及工程判断来确定潜在的失效模式。如果只能在初始检查过程中识别出一种模式，则它不是 FMMEA 中要考虑的失效模式。失效模式需要通过目视检查、电气测量或其他测试和测量直接观察。失效模式识别不应有隐含的原因或机制。危害性是指失效影响的严重性，可以将其分配给每个部位的每种模式。危害性级别的分配基于项目的设计和功、过去的经验以及工程判断。

失效原因定义为特定的过程、设计和/或环境条件所引发失效的原因。潜在失效原因分析能够帮助人们确定驱动给定元件失效模式的失效机理，可以通过 FMMEA 组内的头脑风暴的方式来确定。寻找失效原因的一种方法是查看每个项目的寿命周期环境剖面（LCEP），并评估哪些项会导致失效，分析时需要列出所有可能的原因。

基于与材料系统、工作应力、失效模式和失效原因有关的适当匹配的机理确定潜在的失效机理。失效机理分为过应力失效机理或疲劳失效机理，如表 3.1 所示。寿命周期状况信息可用于排除在给定应用程序下可能不会发生的失效机理。应注意不要将失效机理与失效位置、失效模式或失效原因混在一起。当未确定失效机理时，最好将其记为“未知”或“尚未确定”，而不是做出错误或不明智的决定。

表 3.1 失效机理示例<sup>[10]</sup>

	过应力失效机理	疲劳失效机理
机械	分层、断裂	疲劳、蠕变
热	超过玻璃化转变温度时过度加热组件	空洞扩展、蠕变
电	介电击穿、静电放电	电迁移
辐射	单粒子失效	脆化、电荷陷阱
化学	腐蚀	枝晶、晶须、腐蚀

失效模型通过确定 TTF 或给定几何形状、材料类型、环境和工作条件下发生失效的可能性来帮助我们量化失效。对于过应力失效机理，失效模型可以提供基于应力强度的分析，以估计产品在给定条件下是否会失效。对于疲劳失效机理，失效模型同时使用应力和疲劳分析来量化产品在一段时间内累积的损伤。作为过应力失效机理的简单示例，场效应晶体管的薄氧化物中，如果绝缘薄氧化物介质两端的电场高于该材料的临界场强，则可能会发生过应力情况。在这种情况下，击穿是灾难性、瞬时的。因此，需按照设计标准来选择标称工作电压或氧化物厚度，以使有效电场不超过氧化物的临界电场强度<sup>[11]</sup>。对于疲劳失效机理，一个很好的例子就是集成电路互连线的电迁移。给出一定的几何形状、电流密度和电流方向，基于热力学和动力学的模型可用于估计和预测空位凝聚，随后是空洞的产生和生长（大小和方向性），最终导致通常在阴极端发生的开路失效<sup>[12]</sup>。

表 3.2 总结了不同电子产品的 FMMEA 实施情况及监测数据的对应类型。当使用失效预测器件进行预测诊断时，可以根据已知的失效机理，对失效预测器件的几何形状和/或材料属性进行调整，从而在正常使用条件下加速失效。当使用的模型涉及应力诱导的累积性损伤时，使用合适的传感器组来捕获环境和使用载荷剖面是很重要的，将传感器数据处理、整理成可用在失效模型中的格式。

表 3.2 不同电子产品的 FMMEA 实施情况及监测数据的对应类型

监控产品	潜在失效模式/失效机理	预测方法	监测/分析数据
半导体电路 <sup>[13-17]</sup>	TDDDB、电迁移	熔断器和预测单元	电流密度
电路板 <sup>[18]</sup>	芯片疲劳	熔断器和预测单元	温度
	互连热或振动疲劳	熔断器和预测单元	温度和加速度



续表

监控产品	潜在失效模式/失效机理	预测方法	监测/分析数据
电源 <sup>[19-21]</sup>	焊点热疲劳失效	监测环境和使用载荷	温度剖面
汽车引擎盖下的 PCB <sup>[22-23]</sup>	焊点热或振动疲劳	监测环境和使用载荷	温度、加速度
航天飞机自动机械臂中的末端执行器电子单元 <sup>[24]</sup>	焊点热或振动疲劳	监测环境和使用载荷	温度、加速度
火箭启动器内的板卡 <sup>[25]</sup>	电子部件的热疲劳和振动	监测环境和使用载荷	温度、加速度
	互连线的振动疲劳	监测环境和使用载荷	加速度
笔记本电脑及桌面计算机 <sup>[26-27]</sup>	—	监测环境和使用载荷	CPU 附近的温度
	—	监测环境和使用载荷	主板的温度
	—	监测环境和使用载荷	硬盘的温度
冰箱 <sup>[28-29]</sup>	—	监测环境和使用载荷	总运行时间、压缩机运行时间、开门时间、压缩机周期、除霜周期、开关机周期
游戏机 <sup>[28-29]</sup>	—	监测环境和使用载荷	周围温度、热沉温度、湿度、瞬间电压、光盘转速、产品方向

在产品的寿命周期中，不同的环境和工作参数在不同的应用水平下可能会激活几种失效机理，而通常只有少数的环境和工作参数及失效机理导致了大多数失效。高优先级的失效机理决定了设计中必须考虑或控制的工作应力、环境和工作参数。高优先级机理是指发生度和严重度都很高的机理。失效机理的优先次序为有效利用资源提供了机会。图 3.2 给出了失效机理的优先顺序，可以计算出失效模式和失效机理的风险优先数 (RPN)。

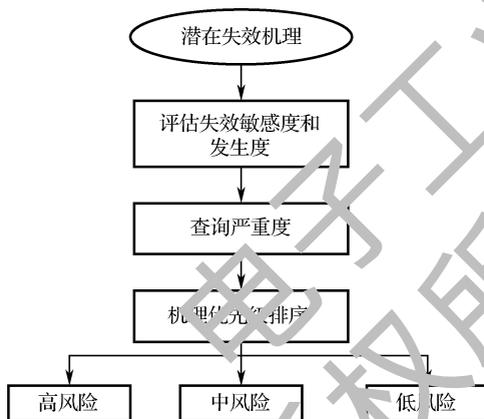


图 3.2 失效机理的优先顺序

估，以确保收集适当的数据用于预测。

LCEP 用于评估失效敏感度。如果某些环境和工作条件不存在或产生的应力非常低，则将仅依赖于那些环境和工作条件的失效机理指定为低发生率。对于过应力机理，通过进行应力分析来评估失效敏感度以确定在给定的环境和工作条件下是否由于超出基本材料极限的过应力而发生失效。对于疲劳失效机理，通过在给定的 LCEP 下确定 TTF 来评估失效敏感度。风险级别的确定基于对单个失效机理 TTF 的基准测试，包括预期的产品寿命、过去的经验和工程判断。在没有失效模型的情况下，评估仅基于过去的经验和工程判断。严重等级是从与该机理相关的失效模式中获得，一种机理可以有多种模式。例如，电迁移会由于阴极上的空隙而在金属互连中引起开路，或者由于金属原子的堆积和挤压应变而形成金属小丘，从而可能导致阳极处的短路<sup>[12]</sup>。高优先级失效机理是关键机理。在列举这些情况时，每种机理将具有一个或多个关联的失效位置、失效模式和失效原因。此信息可用于帮助确定监测参数、监测位置以及数据处理方式，并对实时

状态监测的推论做出反应。

### 3.4.1 电子设备 FMMEA 案例

FMMEA 已应用于众多电子设备的产品设计、可靠性评估和诊断中<sup>[31-35]</sup>。下面将介绍用于锂离子电池<sup>[31]</sup>和大功率发光二极管 (LED) 照明<sup>[32]</sup>的典型 FMMEA 案例。

锂离子电池是众多便携式设备、电动汽车和飞机中使用的最关键的能量存储和供电设备。Hendricks 等<sup>[31]</sup>对锂离子电池实施了 FMMEA，以定义失效的部位、模式、原因和机理，实现了基于失效的物理的电池寿命预测。通过遵循本章所述的 FMMEA 实施步骤，分析了锂离子电池的设计、材料、结构 (见图 3.3)、原理以及可能的使用和工作条件，并在单个电池单元上开发了用于商用锂离子电池的 FMMEA。表 3.3 给出了锂离子电池的 FMMEA (部分结果)。

表 3.3 锂离子电池的 FMMEA (部分结果)<sup>[31]</sup>

部位	潜在故障模式	潜在失效机理	机理类型	影响	潜在失效原因	发生严重度		检测容易程度
						概率	程度	
阳极 (活性材料)	固体电解质增稠	化学还原反应、沉积	磨损	内阻增加、容量下降、功率下降	锂、电极和溶剂之间的化学反应	高	低	高
	颗粒碎裂	机械应力	过应力	容量下降、功率下降	夹层应力	中	低	低
	减少电极孔隙率	机械退化	磨损	扩散阻力增加、容量下降、功率下降	电极尺寸变化	中	低	低
	阳极表面的锂镀层和枝晶生长	化学反应	磨损	如果枝晶刺穿隔膜可能会导致短路	锂电池在低温或高速率下充电	低	高	低
阳极 (集流体)	游离铜颗粒或镀铜	化学腐蚀、反应、溶解	磨损	电阻增加、功率下降、电荷密度下降	锂电池过放电	低	高	低
隔膜	隔膜中的孔洞	机械损伤	过应力	发热增加、电池外壳膨胀、电压急剧降低	枝晶形成，电池外部破碎	低	高	中
	隔膜孔关闭	热导致的隔膜熔化	过应力	电池充电或放电功能丧失	电池内部温度过高	低	高	高
端子	极端腐蚀路径	化学腐蚀反应	磨损	发热增加、电池外壳膨胀、电压急剧降低	内部意外短路	低	高	中
	焊料开裂	热疲劳、机械振动疲劳	磨损	电导率下降	电路断开	低	中	高

Hendricks 等没有定量描述不同失效机理的优先级，而是将它们分为高、中和低三个级别来表示发生度、严重度和可检度。通常，由 FMMEA 小组确定发生度、严重度和可检度的级别。但是该级别随 FMMEA 团队的专业知识水平以及可以获取系统数据的详细程度而改变。此外，计算得出的 RPN 值取决于应用和预期的使用条件。例如，笔记本电脑和电动车辆使用相同的电池，但是其风险等级完全不同。因此，作为通用的 FMMEA 框架，Hendricks 等没有提供详细的分类信息及其相应的排序结果。

Fan 等<sup>[31]</sup>对基于失效物理的高功率 LED 实施了 FMMEA。该案例提供了一个完整的优先级排序。首先，对 LED 结构 (见图 3.4)、材料 (如 CTE、导热系数、弹性模量)、几何形状、工作原理和工艺进行了各个层级 (即芯片、封装和系统) 的分析，然后进行 FMMEA，以识别和列出设计过程中出现的潜在失效。针对高风险性失效，建立了基于失效物理的损伤模型以评估 LED 的剩余寿命。表 3.4 给出了 LED 照明的 FMMEA。基于排序结果，建立由热传递导致的芯



片级亮度退化和热循环导致的焊点互连疲劳损伤的基于失效物理的损伤模型。

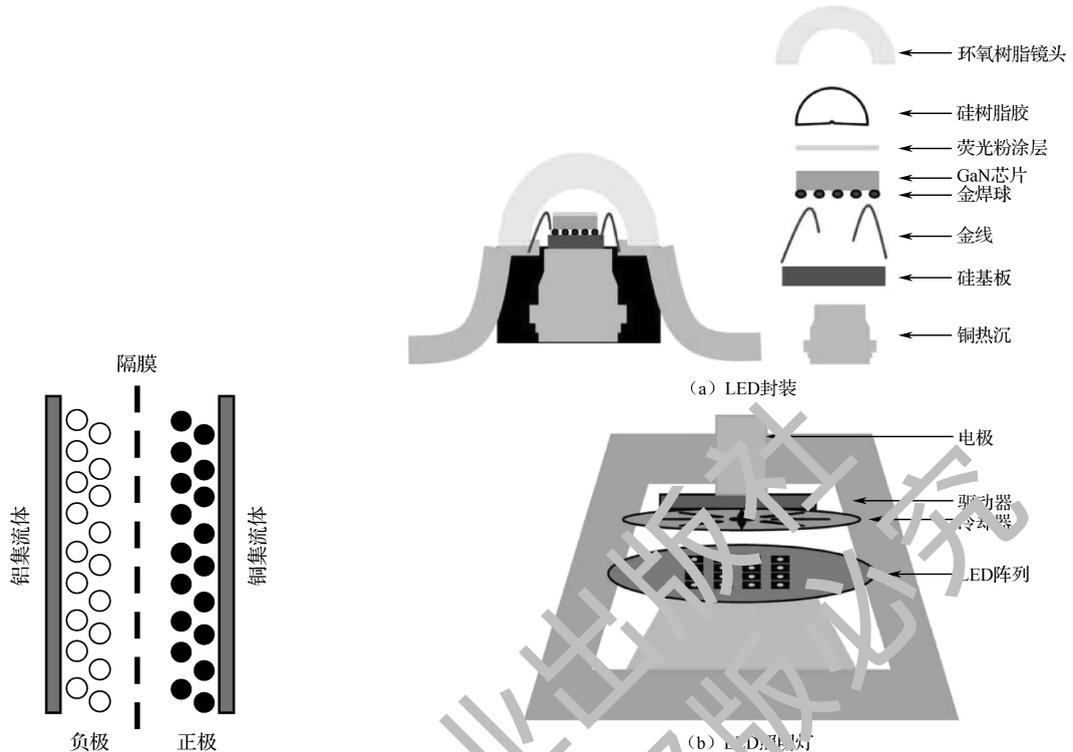


图 3.3 锂离子电池单元基本结构

图 3.4 LED 的结构

表 3.4 LED 照明的 FMMEA 表

失效位置	失效模式	失效机理	排序			
			严重度	发生度	可检度	RPN + S×O×D
PN 结	功率效率下降	缺陷传递	8	3	6	144
P 型层		掺杂扩散	6	2	6	72
接口		分层	7	3	4	84
环氧树脂镜头和硅树脂胶		变暗	6	3	4	72
荧光粉涂层	色变	解聚合	6	3	4	72
焊料互连	开路开路	疲劳	10	5	2	100
冷却系统	热应力增加	老化	5	2	3	30

### 3.5 应力分析

应力分析对于确定失效机理的危害性是必要的。应力分析取决于产品的载荷和结构，需要估计由不同载荷导致的应力水平和危害性。

应力分析通常包括提取施加在产品上的环境和工作载荷的特征。例如，实际热载荷的周期数可用雨流计数方法提取。应力分析还包括将载荷/监控参数转换为局部潜在失效部位的精确应力等级。失效机理和失效预测模型的一些参数很难直接监测。例如，由于元器件被封装在一起，因此焊点的应变范围或应力水平无法在线监控。在这种情况下，通常使用有限元方法来模拟焊点的应力/应变水平与施加到相关组件的同一印刷电路板（PWB）上的热载荷和/或振动载荷之间的关

系。例如，Gu 等<sup>[36]</sup>没有直接监测焊点应变，而是对整个印制电路板（PCB）进行加速试验，并监控 PCB 上每个球栅阵列（BGA）的应力水平，如图 3.5 和图 3.6 所示。然后使用有限元分析（FEA）模型（见图 3.7）提取相对于焊点应变和应力的 PCB 的应变和振动水平，这是与相应失效模型如 Coffin-Manson 模型相关的关键输入参数。

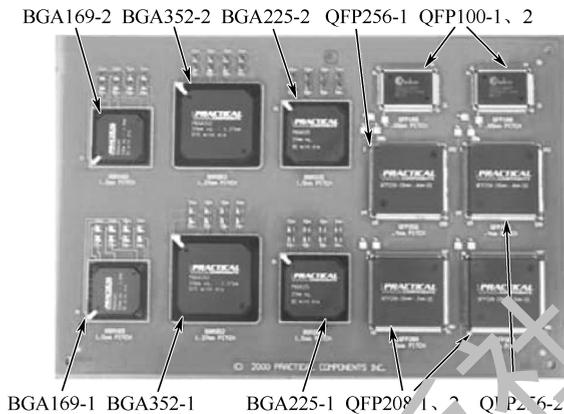


图 3.5 每一块 BGA 通过 PCB 背面的应变片进行应变测量<sup>[36]</sup>

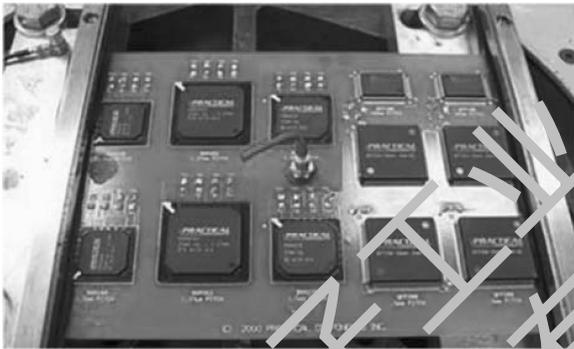


图 3.6 在 PCB 中央的传感器测量加速度<sup>[36]</sup>

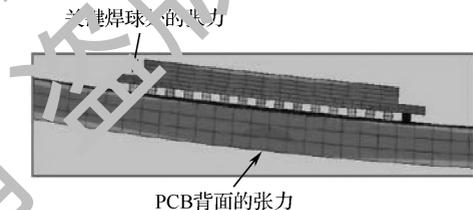


图 3.7 FEA 分析有助于“将测量到的 PCB 应变外推到焊点处的实际局部应变”<sup>[36]</sup>

对于应力分析，由不同载荷（源）产生的相同类型的应力需要一起考虑。例如，特定组件的温度可能是环境温度和在工作过程中元器件内部产生的热量（焦耳热）的叠加，热分析用于确定特定组件或整个产品上的温度分布。对于电子产品中的 PWB，基于组件产生的热量和周围环境温度，热分析将提供基板、元器件结和外壳温度的分布。热分析涉及热传递的三种基本模式（传导、对流和辐射）的热传递方程式的求解。在大多数情况下，稳态温度结果已足够用作评估失效的条件。例如，仅通过确定高点和低点的稳态条件就可以充分定义温度循环。必须确定 PWB 上结构的热容量以确定温度循环中高点和低点温度之间的过渡过程是否真正起到重要的作用。

振动分析可用于确定 PWB 对随机振动的响应。在计算 PWB 的固有频率时，边界条件至关重要。经典边界条件是自由、简单或受约束的。电路卡组件（CCA）的固有频率可以通过实验或数值确定。当通过实验确定时，需要在 CCA 上放置应变仪或加速度计，将 CCA 连接到动态振动台中，并测量 CCA 对已知输入响应。数学上可以使用一阶近似或有限元建模来确定 PWB 的固有频率。

还有许多其他种类的应力分析在这里没有提到。根据产品承受的载荷，采用不同的应力分析方法更适合于计算不同载荷条件下的应力。