

# 故障诊断、预测与系统健康管理

## Diagnostics, Prognostics and System's Health Management

编著：派克·迈克尔  
Michael Pecht  
康锐  
Kang Rui

# **故障诊断、预测与系统健康管理**

## **Diagnostics, Prognostics and System's Health Management**

编著：派克·迈克尔  
**Michael Pecht**  
康锐  
**Kang Rui**

本书中文简体字版由香港城市大学故障预测与系统健康管理研究中心出版。未经出版者书面许可，不得以任何方式复制或抄袭本书内容。

版权所有，侵权必究。

ISBN: 978-0-615-34095-1

Copyright © 2010 by PHM Centre, City University of Hong Kong

出版人：

香港城市大学故障预测与系统健康管理研究中心

(CityU PHM Centre)

香港城市大学

香港九龙

电邮：[phmc@cityu.edu.hk](mailto:phmc@cityu.edu.hk)

# 前 言

故障预测和健康管理 (PHM) 技术进入21世纪以来,正以前所未有的势头在国内外得到了十分迅速的发展,很快受到来自政府,学术和工业界的高度重视,并在机械、电子、航空航天、船舶、汽车、石化、冶金、电力等多个行业领域得到了广泛的应用。

故障诊断、预测和系统健康管理是一种对产品或系统在实际应用条件下进行可靠性评估的方法。其基本思想是基于当前及历史状况信息,研究正常运行状态(即健康)的偏移或退化程度,以此来估计(即预测)将来的可靠性。目前采用的方法包括:(1)使用保险或预警装置;(2)基于数据驱动对故障征兆进行监测和推理;(3)基于系统应用环境和寿命周期载荷开展失效物理(累积损伤)建模。

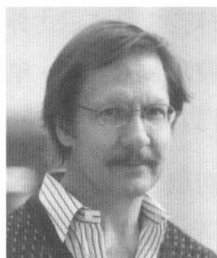
通过评估产品或系统在实际应用环境下的性能退化,并预测其残余(剩余)有效寿命,可以带来显著的价值:

- 及时提供系统失效预警;
- 开展基于状态的维护;
- 获取载荷历史信息,改善设计,品质检验,以及故障根本原因分析;
- 延长维护周期和缩短维修时间,增加系统可用性;
- 降低检修成本,减少停机和库存,降低设备寿命周期成本;
- 减少和预防间歇故障出现;

本书系统地介绍了PHM的基础知识,PHM在电子系统和结构健康监控中的应用,给出了应用于PHM的几种基础方法以及传感器技术,并对采用PHM方法进行预测的优势和带来的经济价值进行了分析。本书对从事 PHM 研究的学生和科研人员具有一定的参考价值。

全书共分为八章,其中第一,三至六章及八章由美国马里兰大学(计算机辅助产品寿命周期工程)电子产品及系统研究中心(CALCE)编写,第二章由北京装甲兵工程学院冯辅周教授编写,第七章由北京航空航天大学孙博老师编写,全书由香港城市大学故障预测与系统健康管理中心派克·迈克尔访问教授和北京航空航天大学康锐教授主编,香港城市大学故障预测与系统健康管理中心王文彬访问教授,牛刚和文振华博士审阅。

## 作者介绍



**派克·迈克尔教授**目前是香港城市大学电子工程系客座教授。他在威斯康辛大学麦迪森分校获得电子工程学硕士学位和工程力学博士学位。他是美国专业工程师，同时也是美国电气电子工程师学会院士（IEEE Fellow）、美国机械工程师学会院士（ASME Fellow）和国际微电子与封装协会院士（IMAPS Fellow）。鉴于他在可靠性研究领域的卓越贡献，2008 年被授予了可靠性领域的最高荣誉——“IEEE 可靠性分会终身成就奖”、“欧洲微纳米可靠性大奖”以及电子封装领域的“3M 研究奖”和“IMAPS 威廉D 艾希曼纪念成就奖”。

派克教授曾担任《IEEE Transactions on Reliability》杂志主编八年，同时在《IEEE Spectrum》杂志的顾问委员会任职。目前他是《Microelectronics Reliability》杂志的主编以及《IEEE Transactions on Components and Packaging Technology》杂志的副主编。他是马里兰大学高级产品寿命周期工程电子产品及系统研究中心（CALCE）的创始人，该中心得到了全球150 多家知名公司的资助，每年的资助超过600 万美元。他还是马里兰大学机械工程系讲席教授和应用数学系教授。他出版过二十多本关于电子产品开发、使用及供应链管理的著作，发表过400 多篇学术论文。他为22 家大型跨国公司提供咨询服务，内容涉及电子产品及系统的策略规划、设计、测试、预测、知识产权及风险评估。



**康锐教授**，北京航空航天大学教授，北京航空航天大学工程系统工程学术委员会主席。香港城市大学客座教授，南京航空航天大学、南京理工大学、电子科技大学兼职教授。毕业于北京航空航天大学电气工程专业，获硕士学位。长期从事可靠性理论与教学工作。曾为100余家企业进行可靠性技术咨询与服务。现兼任国防科技工业可靠性专家组组长，中国探月工程（二期）质量可靠性专家组专家，中国兵工学会维修专业委员会副主任委员，《可靠性工程》期刊主编，《航空学报》期刊编委。是中国故障预测与健康管理学会的发起人之一并任第一届理事长。主要研究方向为产品故障行为预测与控制理论，高可靠长寿命产品设计理论，网络可靠性试验与评价理论。已出版著作4部，发表文章100多篇。

# 目 录

前 言.....	i
作者介绍.....	ii
第一章	
电子系统的故障预测与健康管理的.....	1
1.1 可靠性与故障预测.....	1
1.2 电子产品故障预测与健康管理的（PHM）的重要性.....	3
1.3 PHM 的概念和方法论.....	6
1.3.1 基于保险和预警装置的方法.....	7
1.3.2 基于故障预兆监控与推理的方法.....	9
1.3.3 基于失效物理（PoF）模型的方法.....	14
1.4 “系统系（System of Systems）”的 PHM.....	19
1.5 总结.....	21
参考资料.....	22
第二章	
结构健康监测.....	29
2.1 引 言.....	29
2.2 结构健康监测的概念.....	29
2.2.1 智能材料结构.....	29
2.2.2 结构健康监测技术.....	30
2.2.3 结构健康监测系统的.....	30
2.3 结构健康监测系统的基本组成.....	30
2.4 结构健康监测系统常用的传感器和驱动器.....	31
2.4.1 光纤传感器.....	31
2.4.1.1 迈克尔逊干涉型光纤传感器.....	32

2.4.1.2	微弯型光纤传感器 .....	32
2.4.1.3	光纤光栅传感器 .....	33
2.4.2	压电传感器 .....	34
2.4.2.1	压电陶瓷 .....	35
2.4.2.2	压电薄膜 .....	35
2.4.2.3	压电单晶 .....	35
2.4.2.4	压电复合材料 .....	35
2.4.3	电阻应变传感器 .....	36
2.4.4	碳纤维 .....	36
2.4.5	疲劳寿命元件 .....	37
2.4.6	形状记忆合金 .....	38
2.4.7	智能凝胶材料 .....	38
2.5	结构健康监测中的信号和信息处理技术 .....	39
2.6	结构损伤的控制和修复技术 .....	39
2.6.1	基于形状记忆合金的损伤控制技术 .....	40
2.6.2	基于空芯光纤的损伤控制技术 .....	40
2.6.3	基于中空纤维的损伤自修复技术 .....	42
2.6.4	基于微囊的结构自愈技术 .....	43
2.7	结构健康监控系统的集成技术 .....	43
2.7.1	功能器件与材料结构的集成方法 .....	44
2.7.2	功能器件与材料结构集成后的性能 .....	46
2.7.3	传感网络技术 .....	46
2.7.3.1	光纤传感网络 .....	47
2.7.3.2	现场总线技术 .....	47
2.7.3.3	无线传感网络 .....	49
2.8	结构健康监控系统的应用与发展趋势 .....	50
	参考文献 .....	54

## 第三章

基于传感器系统的故障预测与系统健康管理 .....	57
3.1 传感器和传感原理 .....	57
3.1.1 温度传感器 .....	58
3.1.2 电传感器 .....	59
3.1.3 机械传感器 .....	60
3.1.4 湿度传感器 .....	60
3.1.5 生物传感器 .....	61
3.1.6 化学传感器 .....	62
3.1.7 光学传感器 .....	63
3.1.8 磁传感器 .....	63
3.2 PHM 的传感器系统 .....	64
3.2.1 需要监控的参数 .....	65
3.2.2 传感器系统性能 .....	66
3.2.3 传感器系统的物理属性 .....	66
3.2.4 传感器系统的功能属性 .....	67
3.2.4.1 板上功率和功率管理 .....	67
3.2.4.2 板上内存和内存管理 .....	68
3.2.4.3 可编程采样模式和采样速度 .....	68
3.2.4.4 信号处理软件 .....	69
3.2.4.5 快速方便的数据传输 .....	69
3.2.5 成本 .....	71
3.2.6 可靠性 .....	71
3.2.7 可用性 .....	72
3.3 传感器选择 .....	72
3.4 PHM 实施的传感器系统示例 .....	75
3.5 PHM 传感器技术的发展趋势 .....	78
参考资料 .....	80



## 第四章

基于数据驱动方法的故障预测与系统健康管理.....	81
4.1 介绍.....	81
4.2 参数统计方法.....	82
4.2.1 似然比检验.....	83
4.2.2 极大似然估计.....	84
4.2.3 奈曼—皮尔逊准则.....	84
4.2.4 预期最大化期望最大化.....	85
4.2.5 最小均方差估计.....	85
4.2.6 最大后验概率估计.....	86
4.2.7 Rao-Blackwell 估计.....	86
4.2.8 Cramer-Rao 下界.....	87
4.3 非参数统计方法.....	87
4.3.1 基于最近邻的分类.....	87
4.3.2 Parzen 窗（或核密度估计）.....	88
4.3.3 Wilcoxon 秩和检验.....	89
4.3.4 Kolmogorov – Smirnov 检验.....	89
4.3.5 卡方检验.....	90
4.4 机器学习技术.....	90
4.5 监督性分类.....	92
4.5.1 判别法.....	92
4.5.1.1 线性判别分析.....	93
4.5.1.2 神经网络.....	95
4.5.1.3 支持向量机.....	96
4.5.1.4 判定树分类器.....	97
4.5.2 生成方法.....	98
4.5.2.1 朴素贝叶斯分类器.....	98
4.5.2.2 隐马尔科夫模型.....	99

4.6	非监督性分类 .....	100
4.6.1	校正方法 .....	100
4.6.1.1	主成分分析 .....	100
4.6.1.2	独立成分分析 .....	101
4.6.1.3	基于 HMM 的方法 .....	101
4.6.1.4	基于 SVM 的方法 .....	101
4.6.1.5	粒子滤波 .....	102
4.6.2	生成方法 .....	102
4.6.2.1	层级分类器 .....	102
4.6.2.2	k 最近邻分类器 .....	103
4.6.2.3	模糊 C 均值分类器 .....	103
4.7	总结 .....	105
	参考资料 .....	106
 第五章		
	基于失效物理模型的故障预测与健康管理 .....	113
5.1	基于 PoF 的 PHM 方法通用流程 .....	113
5.2	硬件配置 .....	114
5.3	载荷 .....	114
5.4	故障模式、机理和影响分析 .....	115
5.5	应力分析 .....	118
5.6	可靠性估计和剩余寿命预测 .....	119
5.7	基于 PoF 的 PHM 输出 .....	122
	参考资料 .....	124

## 第六章

基于融合方法的故障预测与健康管理 .....	127
6.1 概述 .....	127
6.2 融合预测方法 .....	128
6.3 案例研究 .....	130
6.3.1 印刷电路板装配中的故障预测 .....	131
6.3.2 预测多层陶瓷电容器的剩余寿命 .....	132
参考文献 .....	135

## 第七章

系统预测的优势分析 .....	137
7.1 概述 .....	137
7.2 PHM 的优势 .....	138
7.2.1 提高系统安全性 .....	138
7.2.2 提高系统可维护性 .....	139
7.2.3 降低生命周期成本 .....	140
7.2.4 提高系统的可靠性 .....	141
7.2.5 协助后勤保障系统的设计 .....	141
7.2.6 提高产品可靠性的预测准确度 .....	142
7.3 实施预测所面临的挑战 .....	142
7.3.1 选择可行的预测方法 .....	142
7.3.2 解决固有的不确定性，评估预测的准确性 .....	144
7.3.3 通过结合预测和成本优势分析来协助决策 .....	145
7.4 未来研究 .....	145
参考资料 .....	147

## 第八章

故障预测与健康管理的经济性.....	151
8.1 投资回报.....	151
8.1.1 PHM ROI 分析.....	152
8.1.2 财务成本.....	154
8.2 PHM 成本建模的术语和定义.....	154
8.3 PHM 实施成本.....	155
8.3.1 不可重复性成本.....	156
8.3.2 可重复性成本.....	157
8.3.3 基础架构成本.....	157
8.3.4 非经济因素考虑和维修方式.....	158
8.4 成本规避.....	159
8.4.1 维修规划成本规避.....	161
8.4.2 离散事件模拟维修规划模型.....	162
8.4.3 固定计划维修时间间隔.....	162
8.4.4 数据驱动型（故障预兆监控）方法.....	163
8.4.5 基于模型（LRU 独立型）的方法.....	164
8.4.6 离散事件模拟实施细节.....	165
8.4.7 运行数据.....	167
8.5 可用性.....	168
8.6 PHM 成本分析示例.....	168
8.6.1 单端口模型结果.....	168
8.6.2 多端口模型结果.....	172
8.6.3 示例业务案例构建.....	176
8.7 总结.....	186
参考资料.....	187

# 第一章

## 电子系统的故障预测与健康管理

在当前激烈的全球竞争下，各大企业都在考虑采用创新方法来提高产品的运行效率。对于许多产品和系统而言，较高的使用可靠性是确保客户满意度的一种良好方法之一。此外，产品故障所带来的严重责任也促使制造商们不断提高使用可靠性和使用可用性<sup>1</sup>。

因此，人们对于监控产品和系统的持续健康状态以提前进行故障预测和协助后勤保障管理产生了日益增长的需求。其中“健康”的定义是产品相对预期正常状态的降级或偏差程度。“预测”表示根据当前和历史健康状况给出的未来健康状态[1]。

“电子系统”属于当今大多数系统的一部分或全部，其可靠性通常对系统可靠性至关重要[2]。本章将简要讲述电子产品及系统的预测和健康监控，以及正在发展中的电子系统故障预测技术。

### 1.1 可靠性与故障预测

可靠性是指产品或系统在规定的使用环境中，规定的时间内完成规定的功能的能力（即不发生故障，并处于指定的性能指标内）。传统的电子产品可靠性预测方法包括 Mil-HDBK-217 [3]、217-PLUS、Telcordia [4]、PRISM [5] 和 FIDES [6]及 GJB299[66]。这些方法依靠收集的故障数据，通常假设系统的组件存在故障率（基本假设为常量），且可通过各种修正系数进行修改，以适用于不同的质量、运行和环境条件。大量事实证明了这种建模方法[7-10]存在很多隐患。大多数人认为这些方法根本不应该用，因为其在预测实际的现场故障方面并不准确，会使预测与实际存在较大的偏差，从而导致极差的设计和后勤保障决策[8][11]。

电子系统可靠性预测的传统方法始于 1965 年出版的 Mil-HDBK-217A。在这本手册中，只有一种单点故障率用于所有单片集成电路，而无论电路的应力、材料或结构如何。Mil-HDBK-217B 出版于 1973 年，其 RCA/Boeing 模型由美国空军根据统计指数（故障率不变）分布进行了简化。从那时起，对这种存有先天缺陷的建模方法，几乎所有的更新都是“补救方法”。1987 年到 1990 年间，美国马里兰大学的产品寿命

<sup>1</sup> 运行可用性的定义为与预期相比，某台设备或系统可在需要时正常工作的程度（以 0 到 1 之间的小数表示，或以相应的百分比表示）。运行可用性的计算方法通常为：正常运行时间除以正常运行时间与停机时间的总和。

周期工程中心 (CALCE) 获得了更新 Mil-HDBK-217 的合同。最终的结论是, 这本手册应当取消, 这种建模方法也不鼓励使用, 显然, Mil-HDBK-217 是有瑕疵的。现在美国国防部中止了对这本手册的更新。

1998 年, 美国电气与电子工程师学会 (IEEE) 1413 标准中的“IEEE 电子系统和设备可靠性预测和评估的标准方法论,” 可提供与可靠性预测的相关因素有关的指导[13]。其配套指南 IEEE 1413.1, “基于 IEEE 1413 的可靠性预测的选择和使用指南”, 则提供了针对特定应用的可靠性预测的相关信息及常用方法评估[14]。此外, 人们还针对基于失效物理 (PoF) 方法进行可靠性预测的优势进行了讨论。

PoF 方法和可靠性设计 (DfR) 方法是由 CALCE [15] 在工业界、政府和其它几所大学的支持下开发出来的。PoF 的原理是利用产品的生命周期内负载和故障机理知识, 来进行可靠性建模、设计和评估。该方法建立在识别产品的潜在故障模式、故障机理以及故障位置的基础之上, 将其作为产品生命周期负载条件的一项功能。每个故障位置的应力都视为负载条件和产品几何及材料特性的函数。失效模型则用于确定故障生成和故障传播规律。

故障预测与健康管理 (PHM) 是一种可在单一产品 (或系统) 的实际应用条件下评估其可靠性的方法。当其与 PoF 模型结合时, 即可根据实际的环境和运行条件来持续更新预测。PHM 方法将感应、记录、环境解析、运行和性能的相关参数相结合, 以显示系统的健康状况。PHM 可通过使用多项技术来感应和解析以下参数:

- 性能降级, 如运行参数与其预期值出现偏差;
- 物理或电学降级, 如材料破裂、腐蚀、界面分层, 或是电阻或电压阈值升高等;
- 生命周期资料变化, 如使用时间和频率、周围温度和湿度、振动和震动等。

故障预测与健康管理框架如图 1.1 所示。

以判断是否进行故障告警, 我们可现场监控一款电子产品或系统性能数据的变化, 并使用预测算法进行分析。利用 PHM 方法。我们也可以预测剩余寿命、降级使用水平, 或者任务成功的可能性。

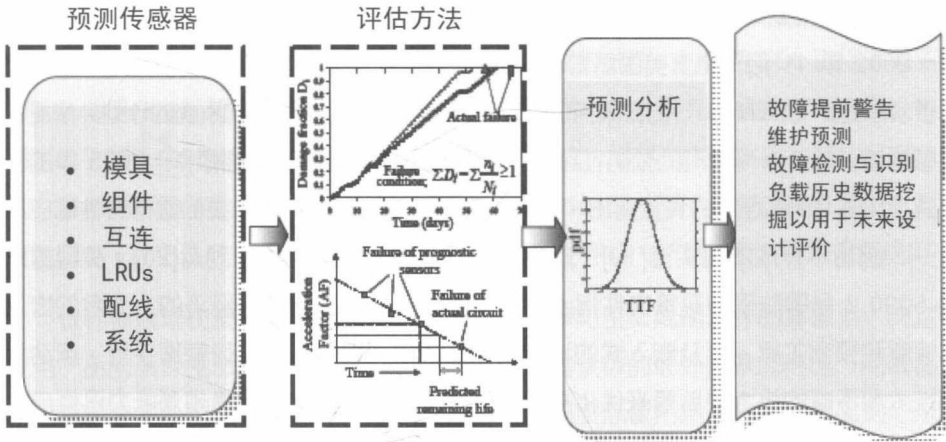


图1.1：故障预测与健康管理体系。

## 1.2 电子产品故障预测与健康管理体系 (PHM) 的重要性

大多数产品和系统都包含重要的电子元件，以提供所需的性能和功能。如果人们能够评估电子系统与预期正常运行状态相比的偏离或降级程度，那么该信息即可用于满足多个重要目标，包括（1）提前预告故障的发生，（2）最大限度减少计划外维护的次数，延长维护周期，并通过及时的维修措施来保持可用性，（3）降低检查成本、缩短停机时间并减少库存，从而降低设备的生命周期成本，（4）提高质量，为已安装的和未来的系统提供设计依据和后勤保障[1]。换言之，鉴于电子系统在为当今的产品和系统提供运营能力方面发挥着越来越重要的作用，故障预测技术已变得炙手可热。

在电子系统的故障诊断监控方面，人们的早期尝试包括使用内建测试（BIT），即使用板上硬件-软件诊断方法来识别和定位故障。BIT 包括错误检测和纠正电路、自检电路，以及自验证电路[1]。电子系统中引入了两种 BIT 概念：中断性 BIT（I-BIT）和持续性 BIT（C-BIT）。I-BIT 在 BIT 运行中将暂停正常设备运行。C-BIT 可对设备进行持续、自动的监控，不会影响正常运行。

一些针对将 BIT 用于故障识别和诊断的研究[16, 17]显示，BIT 易于产生故障错误警告，可导致昂贵而不必要的设备更换、重新评定、发货延迟，以及系统可用性损失。BIT 技术仍在发展，降低错误故障指示的发生是其重要方向。但是，我们也有理由相信所得“错误的故障指示”其实很多故障是实际发生了的，只不过在本质上属于间歇性故障[18]。但是无论如何发展，BIT 技术提供故障预测或剩余寿命评估功能，而是主要作为故障诊断技术来使用。

PHM 是帮助军用系统实现高效系统级维护、降低生命周期成本的关键推动因素之一。2002 年 11 月，负责美国后勤与物资战备的副部长助理颁布了一项称为“增强型基于状态维护 (CBM+)”的政策。CBM+ 的推出旨在将全新和传统系统的计划外修复性设备维修，转变为可预测的预防性维修，从而根据实际需要安排维修作。2005 年的一项对 11 项 CBM 计划的调查指出，“电子系统预测”是当前最必要的维修特性或应用之一，应当不计成本地实施[19]，航空电子行业也非常认同这一观点[20]。美国国防部 5000.2 号国防采购政策文件指出：“项目管理人员应借助于经济的，综合的嵌入式诊断和预测工具，以及嵌入式的训练和测试系统、程序化的项目管理手段、自动识别技术和不断的技术更新等来优化战备完好性工作。”因此，故障预测能力已经成为销往美国国防部的任何系统所必需满足的要求之一。

PHM 还是空间项目应用中的一项首先考虑的因素。位于加利福尼亚州的美国国家航空和宇宙航行局 (NASA) 阿莫斯研究中心 (ARC) 专注于集成系统健康管理 (ISHM) 领域的基础研究，并致力于健康管理系统设计、传感器选择和优化、现场监控、数据分析、预测以及诊断等方面的研究。ARC 的预测中心负责开发各种算法来预测 NASA 的系统和子系统的剩余寿命。ARC 当前的预测项目包括功率半导体设备 (调查功率半导体组件老化将带来的影响、识别故障预兆以构建 PoF 模型，以及开发各种生命周期终止预测算法)、电池 (电池预测算法)、飞机舵机 (PoF 建模和剩余寿命估算的算法开发)、固体燃料火箭发动机故障预测，以及飞机配线健康管理[21]。

除了运行中可靠性评估和维护，健康管理还能有效用于支持产品回收和生命周期终止决策。产品回收表示制造商对其产品在整个生命周期内所负责的责任，包括产品销毁。推动产品回收的动机是生产者对电子废物的责任延伸 (EPR) 概念[22]。EPR 的目的是使制造商和分销商在财务上对其不再有用的产品负责。

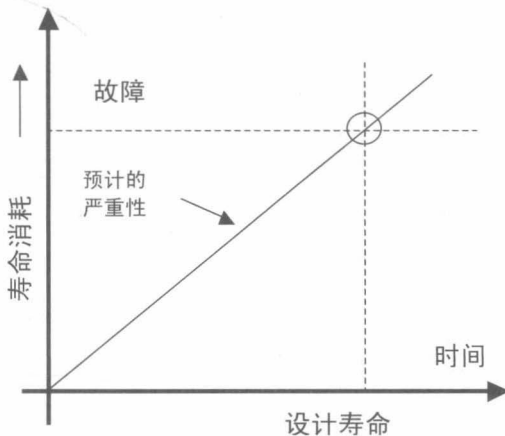
生命周期终止产品回收战略包括维修、重新装备、重新制造、组件重复使用、材料回收，以及产品销毁。在制定生命周期终止决策过程中的一个挑战，就是决定该产品线是否可以取消，任何组件是否可以重复使用，以及哪些子系统应该销毁以最大限度降低系统成本[23]。同时还应考虑一些相互影响的问题，以正确决定最佳的组件重复使用率，包括装配/拆卸成本和流程产生的任何缺陷、原始生命周期中发生的产品降级，以及与生命周期相关的废物流。在这些因素中，估算产品在其原始生命周期中的降级程度是生命周期终止决策中最不确定的一项因素。这可通过健康监控，参与产品生命周期的整个历史相关的知识来有效得出。

Scheidt 等人[24] 建议开发特别的电子端口，他们称之为“绿色端口”，来检索



对电子产品回收和重复使用有帮助的产品使用数据。Klausner 等人[25, 26] 建议使用集成电子数据日志 (EDL) 来记录能够表示产品降级的参数。他们将 EDL 运用于电子发动机, 以提升发动机的重复使用率。在另一项研究中[27], 研究人员通过在内部设备上固定电子单元来对其进行监控, 以收集使用数据。这一举措引入了生命周期数据采集单元, 该单元可用于数据收集以及诊断和维修。Middendorf 等人[28]建议开发生命周期信息模块, 以记录产品的周期状态, 从而进行可靠性评估、产品重新装配和重复使用。

设计师通常在推断加速试验结果和假设使用率与生命周期条件的基础上, 确定可使用产品的质保生命周期。这些假设可能基于不同参数的最坏情景而得出, 而最终用户环境由这些参数组成。因此, 如果假设的条件和实际使用条件相同, 产品的使用寿命也将与预定时间相同, 如图 1.2 : a 所示。但是, 这种情况很少发生, 使用条件和环境条件通常都与假设的数据存在大幅差异。例如, 请想象一种配有寿命消耗监控系统以提供剩余寿命现场评估的产品。在这种情况下, 即使该产品的使用率较高, 并处于严峻的环境中, 其仍可避免计划外维护和灾难性故障, 始终确保安全性并最终节省成本。这就是使用健康监控或消耗监控的典型动机。如图 1.2 : b 所示。制定生命周期终止决策的一个重要因素, 就是对产品剩余寿命和降级的估算。图 1.2 : c 显示的场景区是一台在其预计的寿命末期被回收的产品。您可使用产品内置的健康监控器来评估可重复使用的寿命。与产品回收后进行的测试不同, 这种估算可在无须拆卸产品的情况下进行。根据产品成本、部件需求、组装和拆卸成本及产量等其它因素考虑, 制造商可选择重复使用或销毁产品。



(a) 每项设计的使用情况