

# 前 言

间歇故障(intermittent fault, IF)特指一类没有明显先兆、随机瞬时发生、时有时无、持续时间短的非永久特别故障。国内外装备使用情况表明,间歇故障是装备特别是电子设备服役中后期的一种主要故障类型,是导致装备出现重测合格、无故障发现等问题的主要原因之一,与虚警也密切关联。实质上,间歇故障的危害可能比永久故障更严重,其发生的随机性和可恢复性往往会导致维修成本上升甚至任务失败,为设备维护与后勤保障带来困难。

纵观间歇故障相关技术的研究历程,国内外在该技术领域研究走过了从不确定性检测诊断到确定性检测诊断的曲折道路。2010年以来,随着人们对国内装备间歇故障的深入认识,以及对国外间歇故障研究情况的跟踪,作者深刻意识到:要想真正解决装备间歇故障问题,需要明晰间歇故障发生机理,研究适用的确定性检测和诊断方法。因此,开展确定性的装备部件间歇故障检测与诊断技术研究具有重要的学术价值和工程实际应用价值,这也是撰写本书的根本动因。

本书综合国内外间歇故障检测与诊断技术的最新研究进展,并结合作者多年的研究成果,系统阐述了“机理分析—环境工况激励复现—传播分析—检测诊断—健康评估”这一间歇故障确定性检测与诊断新方案。书中深入分析和建模了装备部件间歇故障的产生原因、机理及表现形式,针对其机理与特点,提出了基于环境激励的间歇故障复现技术;同时,剖析了间歇故障的传播特性与影响,详细介绍了确定性间歇故障检测与诊断技术,以及基于间歇故障特征的健康状态评估与预测技术。

全书共6章。第1章由刘冠军、邱静、苗学问撰写,第2章由刘冠军、吕克洪、沈亲沐、李华康、张勇、刘瑛撰写,第3章由刘冠军、李乾、吕克洪、杨鹏撰写,第4章由吕克洪、李强、梁露月、杨鹏、赵志傲撰写,第5章由刘冠军、邱静、李华康、程先哲、吕克洪、刘瑛撰写,第6章由刘冠军、李乾、程先哲、邱静、张勇撰写。此外,吴青山博士,博士生杨雯翔、罗鑫宇、甄嘉鹏,硕士生于菲阳、郭家俊、刘若怡、黄帅、申凯、吴晓龙、祝尊卿、吴林筱等也参加了全书的撰写和整理工作。

本书相关研究工作得到了国家级科研项目、军队主管部门、原通用测试技术专业组、可靠性系统工程技术专业组的大力支持,在此深表谢意。空军装备部韩峰岩高工、中国电子科技集团公司第十研究所文佳研究员、空军工程大学蔡忠义

副教授等对本书的出版给予了大力支持并提供了很好的建议，在此深表感谢。此外，本书在撰写过程中参考了许多国内外有关学者的论文和著作，在此向各位学者表示感谢。

装备间歇故障检测与诊断技术是一个多学科交叉领域，许多问题尚有待进一步的研究和探索。希望本书的出版能起到抛砖引玉的作用，也希望更多的科技工作者，特别是装备的设计研制人员及使用维护人员，能够关注并加入到装备间歇故障检测与诊断技术的研究和工程应用中，共同推进该技术的发展与应用，使其快速推广应用于各种装备和设备中。

由于作者水平有限，书中难免存在不足之处，恳请读者批评指正。

作 者

2025 年 8 月于国防科技大学

# 目 录

## 前言

|       |                   |    |
|-------|-------------------|----|
| 第 1 章 | 绪论                | 1  |
| 1.1   | 装备间歇故障研究背景        | 1  |
| 1.2   | 装备间歇故障基本内涵        | 3  |
| 1.2.1 | 间歇故障基本概念          | 3  |
| 1.2.2 | 间歇故障与间歇失效         | 4  |
| 1.2.3 | 间歇故障的分类           | 6  |
| 1.3   | 装备间歇故障检测与诊断技术研究现状 | 8  |
| 1.3.1 | 国外研究现状            | 8  |
| 1.3.2 | 国内研究现状            | 11 |
| 1.4   | 装备间歇故障检测与诊断关键技术分析 | 13 |
| 第 2 章 | 装备部件间歇故障机理分析      | 16 |
| 2.1   | 装备部件间歇故障的诱因分析     | 16 |
| 2.1.1 | 装备板内连接型间歇故障诱因分析   | 16 |
| 2.1.2 | 装备板间连接型间歇故障诱因分析   | 26 |
| 2.2   | 装备板内连接型间歇故障机理分析   | 28 |
| 2.2.1 | 板内连接型间歇故障过程分析     | 28 |
| 2.2.2 | 板内典型连接结构特性分析      | 30 |
| 2.2.3 | 焊点间歇故障机理分析        | 32 |
| 2.3   | 装备板间连接型间歇故障机理分析   | 35 |
| 2.3.1 | 板间连接型间歇故障过程分析     | 35 |
| 2.3.2 | 板间连接器动力学与电路模型分析   | 36 |
| 2.3.3 | 板间连接器间歇故障机理分析     | 47 |
| 第 3 章 | 装备部件间歇故障复现技术      | 62 |
| 3.1   | 装备部件间歇故障与环境关联关系分析 | 62 |
| 3.1.1 | 温度应力与间歇故障关联关系     | 62 |
| 3.1.2 | 振动应力与间歇故障关联关系     | 63 |
| 3.2   | 装备部件间歇故障复现总体方案    | 63 |
| 3.2.1 | 装备部件间歇故障复现方案设计原则  | 63 |

|       |                         |     |
|-------|-------------------------|-----|
| 3.2.2 | 装备间歇故障复现方案              | 65  |
| 3.3   | 基于服役环境应力的间歇故障复现方法       | 65  |
| 3.3.1 | 服役环境应力剖面分析              | 66  |
| 3.3.2 | 基于服役环境应力的间歇故障复现流程       | 66  |
| 3.4   | 基于恒加应力的间歇故障加速复现技术       | 70  |
| 3.4.1 | 基于恒加应力的间歇故障加速复现总体方案     | 70  |
| 3.4.2 | 间歇故障加速复现模型              | 71  |
| 3.4.3 | 服役环境应力下间歇故障频次估计         | 73  |
| 3.5   | 基于步进应力的间歇故障加速复现技术       | 80  |
| 3.5.1 | 基于步进应力的间歇故障加速复现原理       | 80  |
| 3.5.2 | 基于步进应力的间歇故障加速复现试验优化模型构建 | 84  |
| 3.5.3 | 基于步进应力的间歇故障加速复现试验优化设计   | 89  |
| 3.5.4 | 基于步进应力的间歇故障加速复现试验优化设计算法 | 90  |
| 第4章   | 装备部件间歇故障传播特性与影响分析       | 92  |
| 4.1   | 装备部件物理层间歇故障的传播特性分析      | 92  |
| 4.1.1 | 装备部件间歇故障的建模与试验模拟方法      | 92  |
| 4.1.2 | 装备部件间歇故障传播演化机理的定性分析     | 96  |
| 4.1.3 | 装备部件间歇故障传播演化机理的定量分析     | 101 |
| 4.2   | 装备部件间歇故障的分层影响分析         | 111 |
| 4.2.1 | 装备部件间歇故障特性与层级分析         | 111 |
| 4.2.2 | 装备部件间歇故障分层传播介质分析        | 112 |
| 4.2.3 | 装备部件间歇故障分层传播路径分析        | 115 |
| 4.2.4 | 装备部件间歇故障分层传播不确定性分析      | 118 |
| 4.3   | 装备部件间歇故障的分层影响建模分析       | 120 |
| 4.3.1 | 基于因果分层拓扑网络的间歇故障传播模型     | 120 |
| 4.3.2 | 基于因果分层拓扑网络的间歇故障传播模型求解方法 | 125 |
| 4.3.3 | 基于 CHTNM 的间歇故障分层传播推理分析  | 130 |
| 4.4   | 装备部件间歇故障传播影响案例分析        | 133 |
| 4.4.1 | 面向毫米波雷达的 CHTNM 构建       | 133 |
| 4.4.2 | 面向毫米波雷达的故障分层传播推理分析      | 136 |
| 4.4.3 | 试验验证与分析                 | 139 |
| 第5章   | 装备部件间歇故障检测与诊断技术原理       | 148 |
| 5.1   | 装备部件间歇故障特性分析            | 148 |
| 5.1.1 | 装备部件间歇故障理论分析            | 148 |
| 5.1.2 | 装备部件间歇故障动力学模型构建         | 152 |

|       |                                   |     |
|-------|-----------------------------------|-----|
| 5.1.3 | 装备部件间歇故障频率特性分析 .....              | 158 |
| 5.1.4 | 装备部件间歇故障随机特性分析 .....              | 165 |
| 5.2   | 装备部件间歇故障极速检测技术 .....              | 171 |
| 5.2.1 | 间歇故障检测方法概述 .....                  | 171 |
| 5.2.2 | 基于锁存与触发的间歇故障检测方法 .....            | 173 |
| 5.2.3 | 基于正交硬件网络结构的多通路并行检测方法 .....        | 177 |
| 5.3   | 基于响应信号特征分析的装备部件间歇故障诊断方法 .....     | 185 |
| 5.3.1 | 基于响应信号特征分析的间歇故障诊断隔离方法思路 .....     | 185 |
| 5.3.2 | 基于小波分析的瞬态响应特征提取方法 .....           | 187 |
| 5.3.3 | 基于小波时频熵能量序列的间歇故障隔离方法 .....        | 191 |
| 5.4   | 基于瞬断放电信号特征的装备部件间歇故障诊断方法 .....     | 194 |
| 5.4.1 | 间歇故障瞬断放电信号特性及放电信号模型分析 .....       | 194 |
| 5.4.2 | 间歇故障瞬断放电信号数据获取 .....              | 197 |
| 5.4.3 | 基于特征提取与支持向量机的间歇故障诊断 .....         | 202 |
| 5.4.4 | 基于卷积神经网络的间歇故障诊断方法 .....           | 216 |
| 5.5   | 装备部件间歇故障检测与诊断系统原理 .....           | 221 |
| 5.6   | 装备部件间歇故障检测与诊断案例分析 .....           | 224 |
| 第 6 章 | 基于间歇故障特征的装备部件健康状态评估与预测技术 .....    | 229 |
| 6.1   | 基于间歇故障时域特征的装备部件健康状态评估与预测方法 .....  | 229 |
| 6.1.1 | 基于间歇故障广义强度的装备部件健康状态表征分析 .....     | 229 |
| 6.1.2 | 基于 HSMM 的装备部件使用状态转移模型构建 .....     | 243 |
| 6.1.3 | 基于 HSMM 的装备部件使用状态评估方法 .....       | 246 |
| 6.1.4 | 基于 HSMM 的装备部件剩余寿命预测方法 .....       | 253 |
| 6.1.5 | 案例分析 .....                        | 255 |
| 6.2   | 基于间歇故障动态响应信号特征的装备部件退化状态评估方法 ..... | 261 |
| 6.2.1 | 间歇故障动态响应信号特性及动力学模型分析 .....        | 261 |
| 6.2.2 | 间歇故障动态响应信号特征分析 .....              | 267 |
| 6.2.3 | 基于深度信念网络和多任务学习模型的退化状态评估 .....     | 277 |
| 6.3   | 基于间歇故障长期演化信号特征的装备部件剩余寿命预测方法 ..... | 284 |
| 6.3.1 | 电连接器间歇故障长期演化信号数据获取 .....          | 284 |
| 6.3.2 | 电连接器健康退化曲线及剩余寿命预测起始点分析 .....      | 289 |
| 6.3.3 | 间歇故障长期演化信号特性分析与导电斑点模型分析 .....     | 294 |
| 6.3.4 | 基于长短时记忆网络与注意力机制的剩余寿命预测方法 .....    | 298 |
| 参考文献  | .....                             | 312 |

# 第1章 绪 论

## 1.1 装备间歇故障研究背景

近年来,随着装备实战化训练水平、任务强度和复杂性的提高,以及临近空间、深空、深海等计划的实施,装备结构越来越复杂,工作环境越来越恶劣,一个“黑色幽灵”越来越多地困扰装备尤其是电子设备的使用和保障,影响任务完成甚至导致任务失败,使保障难度和费用大幅度增加。这个“黑色幽灵”就是装备无故障发现(no fault found, NFF)问题。NFF 是指装备单元在某维修级别被认为故障而拆卸,而在下一维修级别测试没有发现故障的现象。国内外统计发现,目前,NFF 问题在飞机等大型复杂装备中表现日益突出。这些装备在执行任务过程中,其机内测试(built-in test, BIT)等指示了故障,但拆下维修时,近 1/3 的故障排查不出,即使配置强大的自动测试系统也检测不出,导致排故和修理难以下手。NFF 问题直接有损于装备可用度,导致装备任务中断,降低任务成功率,还会导致装备好的部件错误拆换,造成无效的维修活动,增加维修费用和维修时间。如果 NFF 现象出现频率过高,操作者和维修者就会对 BIT 等测试手段失去信任,甚至忽略故障指示,当装备出现真实故障或异常时未进行处置,则可能造成严重后果。目前,国外航空装备维修中,NFF 问题处理费用已经占电子设备维修费用的 30%~50%,成为装备维修领域的棘手问题与“瓶颈”技术问题。研究与分析表明,导致装备 NFF 问题的主要原因是间歇故障(intermittent fault, IF)。

在导致装备 NFF 问题的原因中,间歇故障是一个最重要的原因,如飞机机载线缆的间歇故障问题(图 1.1)。

间歇故障是不同于传统的永久故障的一种特殊故障表现形式<sup>[1]</sup>。我国军用标准 GJB 3385—98《测试与诊断术语》中给出的定义是:产品发生故障后,不经修理而在有限时间内或适当条件下自行恢复功能的故障。实质上,间歇故障危害可能比永久故障更严重,其特点是任务关键时刻随机、瞬时发生,持续时间极短,现地难以捕获与处置,往往导致任务失败,事后难以复现与排故,维护无从下手。目前,在故障诊断领域,间歇故障的检测与诊断问题仍未得到足够重视,原因有两方面:一方面,间歇故障在宏观表象上具有一定的随机性,学术界还未将其归结为一个科学问题展开系统而深入的研究;另一方面,间歇故障不同于永久故障,

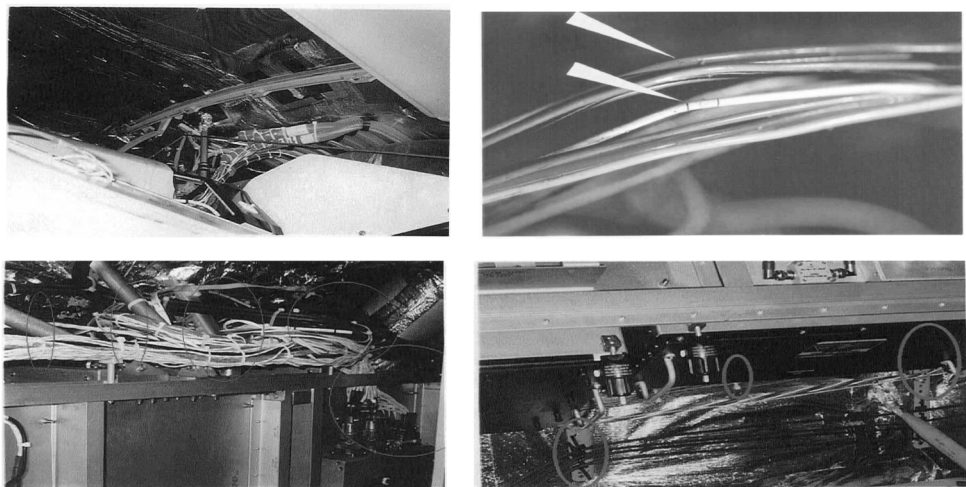


图 1.1 飞机机载线缆的间歇故障问题

由于其瞬变、故障恢复等特性，其故障征兆及特征不易获取，利用传统诊断识别方法进行间歇故障检测与诊断相对困难。但近年来，随着大型复杂装备不断投入应用，装备 NFF 和间歇故障问题已逐渐成为故障诊断领域不可回避的核心问题，受到相关技术领域专家和学者的广泛关注，已逐渐成为当前国际的研究热点。

装备发生间歇故障导致 NFF 问题出现时，会导致装备任务中断，从而进行拆卸、换件等维修工作，会产生大量维修费用。以美国军队的 F-16 战斗机为例，每年由 NFF 问题造成的替换费用(用正常工作的电子箱替换现场测试不通过的电子箱)超过 1300 万美元，加上 40% 的由厂商维修时遇到的类似问题，NFF 问题造成的替换费用超过 2000 万美元<sup>[2,3]</sup>。另外，NFF 问题发生后，被拆故障单元在维修检测合格后无法排除故障或问题归零，并且类似情况发生若干次后，装备使用部门可能不再换件送修，而是凭经验采用重启、重新插拔等手段尝试使设备恢复正常。装备使用部门深刻反映，这种处理方式实属权宜之计，虽然可使设备暂时恢复工作，但并未找到故障原因，无法排除间歇故障问题。装备实际上是带隐患工作的，后续工作时特别是实战化环境下故障可能又会发生，不仅失去了永久故障发生前改进和修复的宝贵时机，而且可能因为间歇故障发生而错过稍纵即逝的任务窗口，直接导致装备的任务失败，成为影响装备可用性和任务成功的重大隐患。由于当前复杂装备 BIT 等检测手段能力有限，各类电子设备中还有相当的间歇故障在装备使用过程中可能未被检测出来，虽然装备没有报警，但装备已经带隐患工作，长此以往，将严重影响装备的完好性和任务执行能力。

在近期及未来几年，随着越来越多的大型复杂装备在我国投入使用，间歇故障尤其是连接型间歇故障将处于高发期，其检测与诊断需求迫切，主要体现在：①连接型间歇故障的出现与使用环境密切相关，随着装备使用与保障强度越来越大，

环境越来越复杂、严酷,连接型间歇故障出现频度会越来越高,将给装备服役安全等带来很大的隐患,严重影响战备完好性和任务执行力;②从国外研究发现的连接型间歇故障发生规律来看,连接型间歇故障也与设备连接环节老化过程相关,在类似的使用环境下,一般在设备寿命前中期出现频度较小,寿命中后期出现频度较大。随着我国各类大型复杂装备服役年限的增长,装备电子设备将面临较严重的连接型间歇故障和 NFF 问题,如我国的某主战装备,已逐步步入电子设备连接型间歇故障的高发期,对装备使用和任务执行的影响将越来越大。由于间歇故障具有随机性、过程时间短等特点,目前的故障检测与诊断方法难以实现对其准确检测、隔离与定位,排故与维修无从下手,而工程中基于经验等简单处理方式不仅不能真正解决该问题,而且可能会导致严重后果。因此,针对电子设备间歇故障,尤其是连接型间歇故障开展检测与诊断技术研究,这对于提高装备完好性和保障效能具有重要意义。

## 1.2 装备间歇故障基本内涵

### 1.2.1 间歇故障基本概念

间歇故障是指持续时间短、可反复出现、未经处理可自行消失的非永久故障,具有随机发生、短时自行恢复的特性。间歇故障最鲜明的特性在于发生时间不确定、持续时间随机。其本质是装备在振动、温度等环境应力和工作载荷长期作用下达到一定退化状态,服役中受到实时的强烈振动、热辐射等高应力产生的一种突变效应,具有随机出现、时有时无、持续时间短的特性。

国内外装备使用调研表明,间歇故障是在装备尤其是装备中电子设备服役中后期出现的一种主要故障类型。在装备使用过程中监控到间歇故障,但在后续更高级别维修环境下间歇故障不再发生,或通过某些手段将间歇故障复现,但现有测试手段无法检测定位间歇故障,是导致装备出现 NFF 问题的主要原因之一。间歇故障是不同于传统永久故障的一种特殊故障表现形式。间歇故障与瞬时故障、永久故障之间的区别如表 1.1 所示。

表 1.1 间歇故障与瞬时故障、永久故障之间的区别

| 故障类型 | 发生原因               | 是否<br>可自行恢复 | 是否<br>可重复 | 故障时间 | 故障位置 |
|------|--------------------|-------------|-----------|------|------|
| 间歇故障 | 临时环境状态、硬件内部损伤/缺陷等  | 是           | 是         | 有限   | 相同   |
| 瞬时故障 | 临时环境状态,如宇宙射线、电磁干扰等 | 是           | 否         | 瞬时   | 不同   |
| 永久故障 | 不可逆的物理性变化          | 否           | 否         | 永久   | 相同   |



由表 1.1 可知,可恢复性是间歇故障区别于永久故障的关键特征。间歇故障发生后,即使不采用维修措施,故障征兆也会消失。而永久故障一旦发生,在未采取维修措施的情况下,电控装置将无法恢复至正常工作状态。间歇故障的可重复性是指,对电控装置施加适当的激励,如振动、温/湿度应力等,使装备在服役过程中出现过的间歇故障可能再一次出现,即复现,在内场复现出间歇故障是下一步间歇故障检测、诊断与评估的基础。间歇故障具有的随机性特征表现为故障发生和故障恢复的不可预测性,因此间歇故障的持续时间为有限时间,其故障征兆也呈现间歇性特征。

图 1.2 为间歇故障的一种表现形式。当装备的性能参数(如电压、电流等)超过故障阈值时,如图 1.2 中虚线所示,则发生故障。在故障持续有限时间后,装备性能参数恢复正常。在一次任务剖面或间歇故障复现周期内,间歇故障可能多次发生,并且不同间歇故障的持续时长、幅值均表现不同。

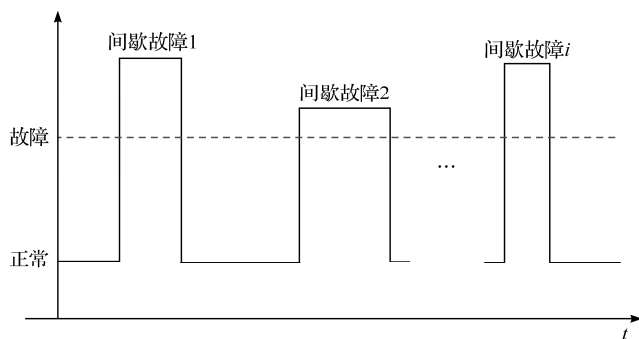


图 1.2 间歇故障的一种表现形式

### 1.2.2 间歇故障与间歇失效

工程中,间歇失效这一术语很常见,那么间歇故障与间歇失效的关系是什么呢?正如 Sugasawa 和 Seya<sup>[4]</sup>所指出,故障(fault)、失效(failure)和错误(error)的含义有所区别。故障为组件失去功能(lose its function)的状态,失效为系统失去特定功能(lose its specified function)的状态,也就是说,如果故障未被修复,它将引发失效。错误则为逻辑上正确的状态与观察值的不一致。在标准 IEC 60050-192《国际电工术语词汇 第 192 部分:可靠性》<sup>[5]</sup>中,明确指出了失效是由故障引发的,故障是失效的原因。在实际应用中,失效和故障的名称有可能是相同的,如齿轮磨损,既是故障模式名称,也是失效模式名称。

对于用户,当其发现产品间歇性地失去功能时就判断产品发生了间歇故障,然而事实上直观上发现的间歇故障只是一种表象,称为系统间歇失效。

系统间歇失效的定义为:系统间歇性地失去规定功能的状态。间歇故障与间

歇失效的关系如图 1.3 所示。

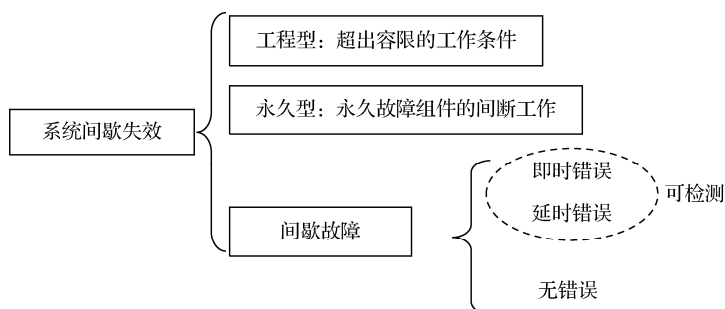


图 1.3 间歇故障与间歇失效的关系

系统间歇失效的原因可能有以下几种。

(1) 超出容限的工作条件。由于设计缺陷、生产工艺的波动、装配误差和参数设置不当，每个器件的容许工作范围不一定符合设计的要求。造成超出容限工作条件的原因既包括外部环境，如振动、温度、湿度、电磁环境的变化，也包括工作应力和载荷的变化。此时该类失效称为工程型系统间歇失效，即由超出容限的工作条件造成的系统间歇失效。

例如，某操控系统开机上电时，关于液位和流量的显示均为 0 或乱码，重启后此现象仍然存在，关机一段时间以后再开机，此现象消失。这是因为处理液位显示的 89C2051 芯片电压过高，其实测值为 5.06V，再加上开机瞬时的冲击电压，导致 89C2051 芯片的供电电压可能超出正常工作的电压，从而造成死机、乱码等故障现象。当调节芯片的电压为 5V 时，故障消失。

(2) 永久故障组件的间断工作。正如 de Kleer 等<sup>[6]</sup>所指出的，有一类间歇故障如果能在更低层级建模，间歇故障将消失。两条线短路造成装备中的某个门电路呈现出间歇故障，事实上是由不期望的连接造成的。在复杂系统装备中，在某一时间剖面，并不是所有器件都参与工作。对某个带有永久故障组件的器件来说，当它参与工作时，故障表现出来；当它未参与工作时，故障则被隐藏。因此，对于它的上一层级，其功能表现出了间歇性的特性。此时该类失效称为永久型系统间歇失效，即由永久故障组件间断工作造成的系统间歇失效。

例如，某操控系统操舵仪在模放通道自动操舵时电磁球阀有时会出现“噼里啪啦”的异响，这是因为航差信号发送电机输出电压在航差不变时有 3.5V 左右的波动，导致操舵仪输出控阀电信号波动，电磁阀频繁通断；再如，操舵微机偶尔出现死机现象，这是因为副操上的线性旋转变压器故障。

(3) 间歇故障。间歇故障的发生是由于产品发生了实质的物理性退化，对系统工作造成间歇性的破坏，并能以相同的特征重复出现。从故障的影响来看，间

歇故障的发生将导致三种结果：无错误影响、即时错误和延时错误。其中，无错误影响是指间歇故障的发生不会造成错误；即时错误是指当间歇故障发生时，立即造成了错误；延时错误是指当间歇故障发生时，在经历一个时间段后才会诱发错误。

无错误影响有两种情况：①当间歇故障的时间过短或者由其造成的非正常信号的阈值过低时，不足以影响系统工作；②当产品本身具有自适应或恢复机制时，所造成的错误被掩盖。例如，网络通信协议具有检错和重发功能，当网络连接器有轻微的接触不良时，个别数据会丢失，但并不会影响通信功能。延时错误是由于信号传输延迟或锁存，使得异常信号不会立即诱发错误。因此，根据故障的结果，间歇故障可分为无错误间歇故障、即时错误间歇故障和延时错误间歇故障。

综上所述，间歇故障具有如下特点：①随机性，即时间上发生的时刻、持续的时长都不确定；②反复性，即在同一个位置反复发生；③可恢复，即故障造成的错误或影响可消除，通常只关注会造成错误影响的间歇故障。根据以上分析，得到间歇故障的本质特点为：无规律重复发生的故障。这与 IEC 60050-192<sup>[5]</sup>中故障的定义保持形式上的一致。在这个定义中，间歇故障为由物理性退化引起的真实故障，以此与系统间歇失效相区分；明确了故障的时间特征，以此与永久故障相区分；指出了间歇故障的重复特性，以此与瞬时故障相区分。

### 1.2.3 间歇故障的分类

从间歇故障的表现形式来看，间歇故障也是分层级的，不同层级的间歇故障具有不同的表现形式。某些间歇故障逐层影响，在装备各个层级都有所体现。以某连接器接触不良导致的间歇故障为例，在器件级表现为连接器接触电阻的不连续，在功能电路级表现为传输的功能信号时断时续，在系统级表现为系统功能间歇性异常，如显示屏闪烁、死机(重启恢复正常)等现象。某些间歇故障对上层次基本无影响，仅在部分层级有所体现。以电源模块的间歇性输出故障为例，由于设备设计有相应的保护措施，瞬时的掉电对系统功能无影响，间歇故障在系统级无明显表现。从间歇故障的持续时间来看，根据 MIL-PRF-32516《间歇故障检测与隔离军用性能规范》可以将间歇故障分为三类：

- (1) 短时间间歇故障，时长在 100ns 以内。
- (2) 中时间间歇故障，时长在 101ns~500μs。
- (3) 长时间间歇故障，时长在 501μs~5ms。

从间歇故障的诱因来看，可以将间歇故障分为两类：

(1) 设计型间歇故障，一般是指由于存在接地、软件缺陷等设计不足，在多个部件与因素相互作用时产生的间歇性故障。这类间歇故障随机性强、规律性差，

难以复现和检测。它可能在试验与使用初期阶段表现出来,因此可通过提高产品可靠性、优化产品设计等技术途径来解决。它不是间歇故障的主要问题,尤其不是老化设备表现出的间歇故障问题。

(2) 耗损型间歇故障,一般是由连接器针脚松动或疲劳、电线断丝或磨损、接触不良、焊点开裂、印制板线连接不良、器件性能退化等导致的间歇性故障。这类间歇故障是产品使用一定时间后的必然物理性表现,其机理多与连接器、焊点、器件等的损伤、退化及外部环境应力密切相关,存在较明确的机理和规律,有可能通过技术攻关实现间歇故障的复现与检测。

在耗损型间歇故障中,有一大类是在装备的连接环节中发生的间歇故障,可定义为连接型间歇故障。这类故障是指由广义连接环节(如连接器、线缆、焊点、接触器等)的损伤或缺陷造成的电路暂时断开的间歇故障。美国军队的统计数据及分析表明,连接型间歇故障占军用飞机间歇故障的80%以上,是装备大多功能间歇异常的底层物理性故障根源。从诱因来看,连接型间歇故障是由电路暂时断开引起的,诱因主要包括焊点松动、针脚松动或疲劳、热敏感元件变形、电线断裂或磨损、电路板线路损坏、噪声元件损坏、连接器腐蚀或氧化、螺丝松动等。

从连接型间歇故障的机理分析来看,一方面,连接型间歇故障与装备连接环节的退化和损伤状态密切相关,即该故障的发生频率等特征会随着装备损伤的加剧而逐渐增加,最终成为老旧电子系统失效的主要原因。一般情况下,在装备服役早期,这类故障表现为短时间的小波动、电压下降或电噪声等,对装备功能不会产生影响。但当装备进入服役中后期时,随着连接环节损伤的加剧,故障的幅值和持续时间也不断增加,逐渐导致装备系统功能的间歇性不正常,并且这种现象是随机发生的,难以检测和复现,即装备的NFF现象。只有当这类故障发展到晚期时,常规的BIT和自动测试设备(automatic test equipment, ATE)才能检测到。另一方面,连接型间歇故障还与装备的工作环境因素密切相关。国内外工程实践表明,这类故障的表现通常遵循如下规律:在环境应力消失后,故障随之逐渐减少或立即消失;如果再次受到环境应力的作用,这类故障又随机出现。因此,连接型间歇故障发生的根本原因是,产品中存在一定的缺陷或损伤,并与环境应力因素相互耦合。

从连接型间歇故障的分类来看,在现代电子设备中,各种各样的电子元件都是通过一定的连接方式形成一个整体,从而构成器件、模块、设备,甚至一个系统。因此,根据电子设备内外连接的功能,国际上把电子设备互连分为六级:芯片封装的内部连接、芯片封装引脚与印制电路板(printed-circuit board, PCB)的连接、印制电路板与导线或印制电路板的连接、底板与底板的连接、设备与设备之间的连接、系统与系统之间的连接。这些连接可通过焊接、连接器、开关、继电器、触点、传输线和线缆等形式实现。因此,依据上述连接方式,以电路板单元

为基础, 可以将连接型间歇故障大致分为广义的两大类: 板内连接型故障和板间连接型故障。其中, 板内连接型故障主要包括芯片封装内部的连接、芯片封装引脚与 PCB 的连接、PCB 内部线路的连接等导致的间歇故障。板间连接型故障主要包括 PCB 与导线的连接、PCB 与 PCB 之间的连接、底板与底板之间的连接、设备与设备之间的连接、系统与系统之间的连接等导致的间歇故障。

## 1.3 装备间歇故障检测与诊断技术研究现状

### 1.3.1 国外研究现状

国外早在 20 世纪 60 年代就开始了间歇故障相关技术的研究。纵观半个世纪的研究历程, 国外在该技术领域研究走过了从不确定性检测到确定性检测的曲折道路, 具体可以分为两个阶段。第一个阶段为不确定性检测与诊断方法阶段, 20 世纪 60 年代以来, 针对间歇故障时有时无、随机性强的外在表现, 其研究主要集中在基于统计推理、随机过程模型等不确定性检测与诊断方法方面。第二个阶段为确定性检测与诊断方法阶段, 2010 年前后, 研究人员逐渐意识到不确定性检测与诊断方法在解决间歇故障问题方面的本质不足和根源, 从间歇故障的物理机理入手, 研究确定性的检测和诊断方法, 在机理、方法、设备及应用方面取得了突破性进展。

#### 1. 间歇故障不确定性检测与诊断方法

早在 1967 年, 航天领域就开始关注间歇故障问题。几十年来, 国外从诊断方法的角度对间歇故障诊断开展了大量研究, 在传统的故障诊断方法的基础上, 将间歇故障纳入判决范围, 提出了许多基于数据、统计模型的间歇故障检测与诊断方法, 具体如下。

##### 1) 基于数据驱动的间歇故障检测与诊断方法

基于数据驱动的间歇故障检测与诊断方法是直接将观察值进行数据处理或统计推理, 以得到诊断结论。常用的方法包括聚类分析、决策树、概率推理及其他模式识别技术等。

(1) 基于特征分析的方法。Zanardelli 等<sup>[7]</sup>和 Sajjad 等<sup>[8]</sup>分别采用短时傅里叶变换(short-time Fourier transform, STFT)、维格纳-维尔分布(Wigner-Ville distribution, WVD)、崔-威廉姆斯分布(Choi-Williams distribution, CWD)对间歇故障的信号特征进行提取, 采用线性分类器和 k-means 分类器两种聚类分析方法, 实现对间歇故障的判别。

(2) 基于决策树的方法。Singh 等<sup>[9,10]</sup>和 He 等<sup>[11]</sup>针对汽车电子控制单元

(electronic control unit, ECU)间歇故障的识别定位问题,利用存储于动力总成控制模块(powertrain control module, PCM)中的故障码和工作状态参数,并通过计算信息熵的方法提出决策生成和特征状态参数选取算法,从而辅助维修人员进行维修排查,大幅缩短维修决策时间。

(3) 基于概率推理的方法。de Kleer 等<sup>[6]</sup>以自检测打印机为例,针对经过多模块任务,通过观测任务的失败或成功,分别在单个永久故障、单个间歇故障、多个永久故障、多个间歇故障的情况下,估计模块故障的后验概率,以实现间歇故障的隔离。

## 2) 基于模型的间歇故障检测与诊断方法

基于模型的间歇故障检测与诊断方法是构造间歇故障诊断问题的数学模型,将观察值输入模型中,或学习训练得到模型参数,由模型参数进行进一步推理,进而得到诊断结论。依据模型的不同,基于模型的间歇故障检测与诊断方法主要分为两类。

### (1) 基于随机过程模型的方法。

随机过程模型有如下几种。

① Petri 网模型。Shen 等<sup>[12, 13]</sup>使用 Petri 网描述含间歇故障的系统特性,使用可达树表示模型的动态行为,用马尔可夫(Markov)更新过程分析系统随机行为,得到吸收状态的极限概率。Krasnobaev V A 和 Krasnobaev L A<sup>[14]</sup>采用 Petri 网建立间歇故障发生过程的模型,并对该模型进行分析,以确定影响故障概率的过程参数。

② Markov 模型。Nakagawa 和 Yasui<sup>[15]</sup>以连续参数 Markov 模型为基础,推导了间歇故障相关的检测概率和检测时间。Breuer<sup>[16]</sup>提出了二状态离散参数的间歇故障 Markov 模型。Prasad<sup>[17, 18]</sup>建立了连续参数三态 Markov 模型,用于区分正常、间歇故障、永久故障状态,进而分析得到可靠性和平均故障间隔时间。

③ 概率统计模型。Ismaeel 和 Bhatnagar<sup>[19]</sup>研究了组合电路的间歇故障诊断,提出 TDM 模型,该模型可以预先确定特定故障模式的测试向量。Ricks 和 Mengshoel<sup>[20]</sup>提出了基于间歇故障和永久故障的贝叶斯网络模型,扩展了处理永久故障的诊断算法,并将其用于间歇故障诊断。

### (2) 基于系统信息模型的方法。

Fu 和 Beigel<sup>[21]</sup>针对多处理器网络间歇故障的诊断问题,提出了相应的测试和诊断算法,该算法可诊断出所有永久故障和部分间歇故障。Mallela 和 Masson<sup>[22]</sup>研究了相互连接和测试系统的间歇故障数量问题,给出了间歇故障诊断的充分和必要条件,并分别针对间歇故障和瞬时故障提出了隔离和任务结果处理的过程及方法。Blom 和 Lippolt<sup>[23]</sup>针对通信网络间歇故障问题建立了瀑布型网络结构模型,通过对组件故障概率进行更新,检测出间歇故障。

① 离散事件系统模型。Contant 等<sup>[24, 25]</sup>构建了考虑间歇故障的离散事件系统

模型, 对其可诊断性的充分必要条件进行了论证, 并基于此构建了诊断器, 对系统事件进行了状态评估, 从而实现故障的检测。Correcher 等<sup>[26]</sup>基于离散事件系统构建诊断器, 通过获取部件发生故障和恢复状态的概率来诊断间歇故障, 并以含四个发动机的铣床为例进行了验证。Carvalho 等<sup>[27]</sup>针对传感器间歇故障建立了离散事件系统模型, 并构建了诊断自动机来识别间歇故障。

② 状态空间模型。Yamasu 等<sup>[28]</sup>针对飞机布线系统功率线路的间歇故障, 建立了正常和故障状态线路的状态空间描述模型, 利用最小二乘法估计负载电路模型的系数或参数, 通过阈值判断间歇故障。Sedighi 等<sup>[29]</sup>研究了基于状态空间模型的间歇故障检测方法, 构造残差和动态阈值, 进行了间歇故障检测。

③ 决策优化模型。Savir<sup>[30]</sup>以小于  $n$  次测试检测出间歇故障的概率最大为目标, 引入逃脱概率(escape probability, EP)来描述系统间歇故障的漏检率, 构建了间歇故障诊断的决策优化模型并进行了求解。Kranitis 等<sup>[31]</sup>研究了嵌入式流水线处理器中间歇故障的最优周期测试, 以测试费用(时间)最小为目标计算最优的测试间隔时间, 并使用数值方法进行求解。

总之, 在 2010 年之前的几十年间, 国外针对间歇故障检测与诊断问题提出了大量基于统计推理、随机过程模型等的间歇故障检测与诊断方法。这些方法虽然从不同角度对间歇故障问题进行了机理分析和建模, 但其诊断结果大多是判断可能发生间歇故障, 难以确切给出间歇故障的发生位置、强度、表现情况等维修和排故时所需要的故障信息, 而且它们大多需要大量间歇故障先验数据支持, 而间歇故障天然样本难以获取和稀少, 较大影响了其诊断准确性。另外, 这些方法并没有考虑到装备使用环境下出现的间歇故障在后续维修级别环境下基本不再发生, 直接使用易造成故障漏检。因此, 多年来的研究成果大多停留在方法层面, 难以准确检测工程实际中的间歇故障, 在解决装备间歇故障及 NFF 问题方面始终缺乏有效解决方案, 装备间歇故障甚至一度被认为无法真正有效检测与诊断。

## 2. 间歇故障确定性检测与诊断方法

从信号层面来看, 实现简单间歇故障如线缆间歇故障的确定性检测可以采用线缆瞬断检测方法, 但该方法一般仅适用于简单连接线缆且正在发生的间歇故障, 难以解决存在众多连接环节和器件的设备间歇故障检测、隔离及 NFF 问题。

2010 年前后, 美国、英国等国家的装备间歇故障与 NFF 问题越来越严重, 对装备任务执行和保障费用的影响越来越大, 到了必须解决的地步。因此, 近年来国外装备管理、使用、研制部门与测试诊断领域空前重视, 开展了更深入的分析与研究, 取得了较多成果, 特别是在耗损型间歇故障机理、确定性检测与诊断方面取得了突破性进展。