

译者前言

无故障发现(no fault found, NFF)是指装备单元在某维修层级被测试或判断为故障而移除,却在下一维修层级测试时未发现故障的现象。国内外装备服役情况表明,在装备电子设备的维修费用中,大约 60%是 NFF 导致的,由此可见,NFF 已成为装备维修保障领域面临的瓶颈问题。从本质上讲,NFF 涵盖了虚警、重测合格(re-test OK, RTOK)、无法复现(can not duplicated, CND)等相关概念。

针对装备维修保障领域日益增多的 NFF 问题,美国 2008 年发布了关于 NFF 的标准 ARINC 672—2008,该标准系统分析了装备设计生产、任务使用、外场维护、内场维护等过程中产生 NFF 的原因,并给出减少 NFF 的措施,系统规范了 NFF 的处置策略。2015 年,在英国 NFF 相关研究项目支持下,原书作者编写出版了 *No Fault Found: The Search for the Root Cause* 一书,系统阐述了 NFF 的诱因及处置方案,在国外装备维修保障行业中反响巨大,而国内鲜见专门针对装备 NFF 问题的研究成果和相关书籍。在国内开展 NFF 诱发根源分析与处置对策研究具有重要的学术价值和工程价值,这是翻译本书的根本动因。

作为第一本专门论述装备 NFF 问题的著作,原书介绍 NFF 的基本概念和相关术语,重点针对人为影响、可用性、安全性、管理政策等因素导致 NFF 的原因和根源进行详细论述。在此基础上,从 NFF 处置基准工具、系统和诊断设计改进等方面介绍减少 NFF 的技术,为装备 NFF 问题的寻根溯源和处置对策提供参考。

参与全书翻译的有吕克洪、刘冠军、程先哲、刘瑛、邱静、杨鹏、张勇、吴青山、郭斯琳,研究生于菲阳、郭家骏、刘若怡、黄帅等也参加了全书的编撰和整理工作。

本书的翻译得到了政府、军队有关部门和可靠性系统工程专业组的大力支持,原空军装备部韩峰岩研究员等对本书的翻译提出了很好的建议,在此深表感谢。

装备 NFF 问题涉及多学科交叉领域,许多方面尚有待进一步的研究和探索。译者希望本书的出版能引起国内学界关注,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关注并加入到装备 NFF 问题的研究和工程应用中来,共同推进装备 NFF 问题的解决。

由于译者水平的限制,书中难免存在不足之处,恳请读者批评指正。

译者

2025 年 8 月于湖南长沙国防科技大学

致 谢

在此，作者由衷感谢克兰菲尔德大学工程与物理科学研究理事会 (EPSRC) 全寿命周期工程服务创新制造中心在本书撰写过程中提供的支持。该中心由工程与物理科学研究理事会于 2011 年 6 月成立，是克兰菲尔德大学和杜伦大学的合作伙伴，主要承担 5 项研究工作，其中之一便是 NFF 研究。初始研究表明，公共领域很少讨论关于 NFF 的知识和信息，即使有少量信息，也仅体现在专业出版物中或者仅向有限团体或行业开放。因此，我们在开展这一项目的早期就希望撰写一本书籍来弥补上述不足，为广大工程师和管理人员提供相关基础。该中心在项目期间开展的研究及获得的知识，为本书提供了极佳的材料和灵感。

在此，非常感谢中心主任 Raj Roy 教授的鼓励和国际自动机工程师学会 (SAE) 提供的机会。尤其要感谢国际自动机工程师学会的 Monica Nogueira 女士，她帮助实现了书籍出版的愿望。

作 者

目 录

译者前言

致谢

第 1 章 引言	1
1.1 研究背景	1
1.1.1 维修和无故障发现——历史视角	2
1.1.2 无故障发现在航空航天领域中的增长趋势	4
1.1.3 无故障发现相关文献	7
1.2 无故障发现现象	8
1.3 无故障发现成本	12
1.4 本书的研究范围	13
参考文献	14
第 2 章 基础知识和术语	16
2.1 概述	16
2.2 系统的基础知识	16
2.3 失效和失效类型	17
2.4 故障和故障类型	18
2.5 维修和相关术语	20
2.6 无故障发现术语	21
2.6.1 无故障发现分类	22
2.6.2 案例研究——术语不统一的影响	27
2.6.3 其他相关术语	28
2.7 本章结论	29
参考文献	30
第 3 章 人为影响	32
3.1 概述	32
3.2 人为因素	32
3.2.1 机构组织因素	33
3.2.2 沟通因素	35
3.2.3 引发无故障发现的人为因素	37

3.3 维修工程师与系统之间的交互	38
3.3.1 民用飞机的典型维修流程	38
3.3.2 硬件交互	40
3.3.3 软件交互	40
3.3.4 环境交互	41
3.4 人为因素调查	41
3.4.1 调查概述	42
3.4.2 飞机测试资源	42
3.4.3 飞机维修手册	44
3.4.4 组织压力	45
3.4.5 维修工程师的能力与培训	47
3.5 最佳实践指南	50
3.6 本章结论	51
参考文献	51
第4章 可用性	53
4.1 概述	53
4.2 航空维修实践	54
4.3 维修系统的质量	56
4.4 维修设计和系统有效性	57
4.5 可用性的实际表现和应用	58
4.5.1 可用性的相关方面	58
4.5.2 可靠性、可用性和维修性的设计要求	62
4.6 无故障发现对可用性的影响	63
4.7 改进流程	67
4.7.1 流程概述	67
4.7.2 无故障发现的使用环节监测方法	69
4.7.3 单元移除数据表	70
4.8 本章结论	71
参考文献	72
第5章 安全性	73
5.1 概述	73
5.2 故障和安全性	73
5.3 概念讨论	75
5.4 航空监管问题	77
5.5 故障与维修错误之间的联系	78

5.5.1 维修的影响	78
5.5.2 运营压力	79
5.5.3 人为因素影响	80
5.5.4 诊断维修	83
5.6 案例研究——无故障发现和航空安全性	84
5.7 本章结论	85
参考文献	85
第 6 章 基于管理指导的运营策略	87
6.1 概述	87
6.2 全寿命周期工程服务	87
6.3 无故障发现缓解策略要求	93
6.4 无故障发现控制过程——基于 ARINC 672—2008 标准	95
6.5 应用示例	100
6.5.1 示例概述	100
6.5.2 实施先决条件	100
6.5.3 应用详情	101
6.6 本章结论	103
参考文献	103
第 7 章 无故障发现的基准工具	105
7.1 概述	105
7.2 无故障发现管理的优势	105
7.3 无故障发现研究的挑战	107
7.3.1 技术挑战	108
7.3.2 商业挑战	108
7.4 管理无故障发现的工具	109
7.4.1 基准工具	109
7.4.2 无故障发现成熟度模型	110
7.5 工具部署	116
7.6 本章结论	117
参考文献	117
第 8 章 系统和诊断设计改进	119
8.1 概述	119
8.2 诊断设计	120
8.3 诊断设计信息反馈	121

8.4 诊断设计和无故障发现	122
8.4.1 使用反馈活动	123
8.4.2 诊断设计活动	123
8.5 系统设计和系统完整性	124
8.6 测试性	126
8.7 培训水平	127
8.8 用户交互和系统设计	127
8.9 本章结论	128
参考文献	128
第9章 减少无故障发现的技术	130
9.1 概述	130
9.2 先进故障诊断	131
9.2.1 电气系统健康和状态监测	131
9.2.2 机内测试	131
9.2.3 故障前兆监测与推理	134
9.2.4 全寿命周期负载监测	135
9.3 测试能力改进	136
9.3.1 测试性作为设计变量	136
9.3.2 功能测试和完整性测试	138
9.3.3 环境测试	140
9.3.4 测试站管理	140
9.3.5 备件单元跟踪	141
9.4 本章结论	142
参考文献	143
第10章 全书总结和展望	144
作者简介	149

第1章 引言

1.1 研究背景

在当今社会，技术系统已深度嵌入人们的日常生活之中，这种高度依赖性使我们格外易受技术系统故障的冲击。任何性能退化或异常状况都可能引发系统中断，这不仅会引起用户、设备制造商、供应商、运营商及维修商的高度关注，更可能对安全保障、运营秩序、品牌形象造成负面影响，甚至直接削弱价值链各环节的盈利能力。

这类问题往往呈现出多样化的表现形态。以性能退化为例，若为缓慢发生的退化，则有充裕时间寻找并更换新部件，通常属于可应对的小问题。棘手的情况是零件突发失效(即快速退化)，也就是说，在更换部件前，设备已丧失执行设计功能的能力，但这也是可以接受的，人们尚可以理解其中的因果联系并且能够轻松对其进行补救。真正的隐患在于异常行为，即系统或子系统的实际行为偏离设计预期。其中，一类问题是突发行为，这主要是由于不同子系统交互的复杂性，系统表现出非预期的反应；另一类问题是无法确定根本原因的故障，此时，即使更换了可疑的部件，也还是会发现故障并没有消失，但是在该部件的台架测试时，故障却消失了，这一问题称为无故障发现(no fault found, NFF)，即本书研究的主题。当 NFF 现象发生时，虽然可以通过更换部件来恢复系统功能，但是难以明确具体故障成因。此类问题无法诊断，因此产生的成本已经成为经营成本的一部分。当然，现在公司的运营效率已经远非一二十年前可比，但是也无法容忍这种巨大的开销，因此必须对这一问题的背后原因开展针对性的研究。

图 1.1 呈现了一个通用运营环境，这类场景在航空、铁路、能源等涉及高成本复杂设备运营的行业中非常常见。具体而言，原始设备制造商(original equipment manufacturer, OEM)向运营商交付设备资产，运营商通过设备运营来获取收益。在使用过程中，运营商需要对设备进行定期维护维修，而维修人员需要通过原始设备制造商的供应链获取备件支持。整个过程均需要遵循行业标准及特定行业认证要求。当然，实际场景远比图中更为复杂，但是在此处展示该图是为了说明 NFF 可能影响众多部门，同时为降低其影响所产生的成本提供研究框架。本书在某种程度上涵盖了图中显示的所有部门。

为了补充和丰富图 1.1，本章分别引出产品服务系统(product service system, PSS)和综合装备健康管理(integrated vehicle health management, IVHM)。产品服

务系统^[1](或服务化^[2])源自一些原始设备制造商将自身的商业模式从销售产品转变为销售服务。在销售产品模式中,收入来自原始产品销售,而未来收入取决于备件销售。在销售服务模式中,维修服务与产品同时出售,因此制造商每月都可以通过执行有效维修获得一笔稳定的收入。此时,原始设备制造商就成为了设备维修商,掌握了更多的价值链,但同时也承担了更多 NFF 经营成本。综合装备健康管理^[3]的目的是更好地为原始设备制造商提供其资产在使用过程中的行为信息,提供传感器数据作为资产,并能够通过诊断或预测算法将原始信息处理成可操作的信息。为了实现故障隔离,综合装备健康管理在部件发生退化的情况下会发出重要信号,提示运维部门开展相应的工作。

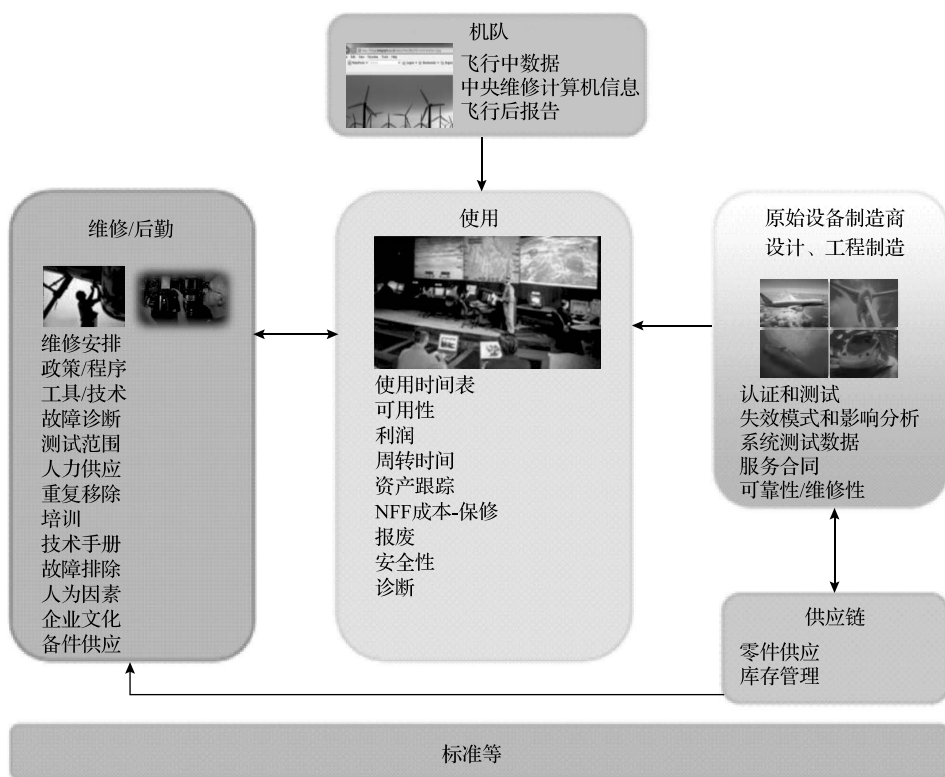


图 1.1 通用运营环境

1.1.1 维修和无故障发现——历史视角

为了解 NFF 在当今维修实践中的作用,有必要对其历史发展脉络加以研究。虽然无法对 NFF 一词进行完整的追根溯源,但是可以发现,早在 1954 年, NFF 就已经开始被用到维修相关主题上^[4]。尽管文献[4]讨论的是机载无线电设备的维修

计划，但同时也注意到了在台架测试中无法确认故障导致的计划外移除情况：

机组人员或维修人员反馈设备存在故障，但检测时却无法复现问题。出现此类移除主要有四类原因：①误报故障，即设备不存在故障；②错误诊断，即故障不移除部件中，而是在其他部件中；③测试程序不正确或应用错误，即使用了错误检测项目，或检测流程操作有误；④无效测试，即规定的检测项目无法排查出该故障。

以上四类问题在如今的系统中依旧普遍存在。事实证明，NFF 问题已然成为行业难题，严重扰乱各类现代维修管理方案的正常执行。

图 1.2 给出了自 20 世纪 50 年代以来维修系统的自然演变情况，可以发现，部件复杂性逐渐增加、系统不断集成化，以及因此产生的系统维修需求也随之提高。为了应对维修挑战，世界各国已经推广并发展了系统工程学科，目的是适应交互式系统的发展进步。从 NFF 的角度来看，这意味着系统变得更加错综复杂，可能需要更加复杂和严格的测试程序来处理报告的故障，从而推导出可靠且可信的结果。

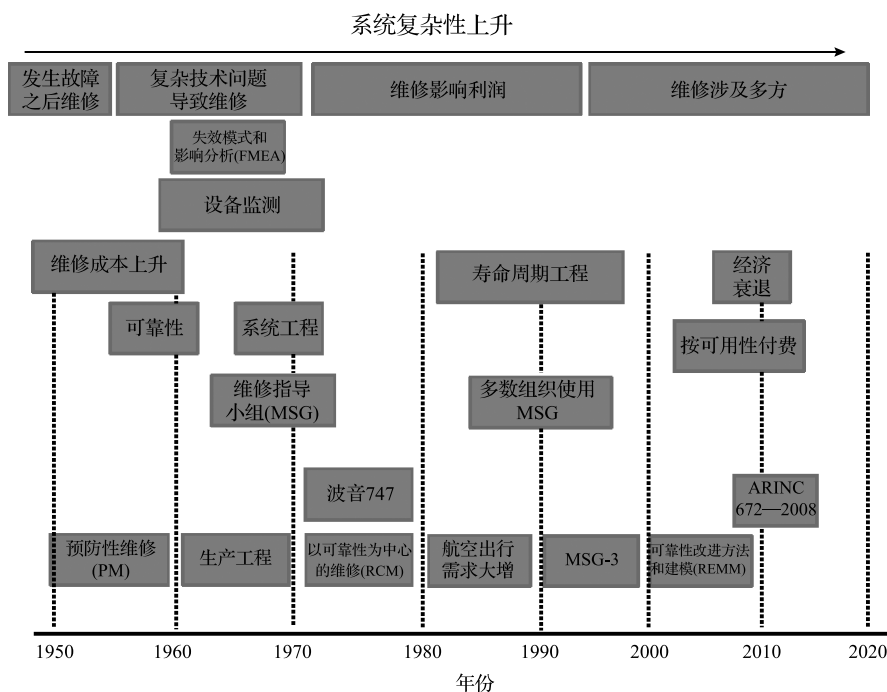


图 1.2 维修系统的自然演变情况

注:MSG 为 maintenance steering group,维修指导小组;PM 为 preventive maintenance,预防性维修;RCM 为 reliability centered maintenance,以可靠性为中心的维修;FMEA 为 failure mode and effects analysis,失效模式和影响分析;REMM 为 reliability enhancement methodology and modelling,可靠性改进方法和建模

就行业而言，NFF 问题在航空航天领域中较为突出，主要体现在飞机航空电子设备上，因此 1.1.2 节将专门讨论航空航天领域的 NFF 问题。

航空电子设备的问题表明，在现代系统中，电子元件的数量与 NFF 严重程度之间呈正相关关系，同时表明，随着时间的推移，原来可以忽略的问题可能会逐渐发展为需要人们重视的战略问题。

1.1.2 无故障发现在航空航天领域中的增长趋势

到 20 世纪 60 年代末，市场竞争越发激烈，各行各业对维修停机时间的容忍度越来越低，与此同时，系统复杂性和维修要求越来越高，大修活动不仅成本高，而且无法达到可接受的安全性水平。因此，民用航空航天领域认识到，在小型飞机上行之有效的商业和管理实践，对大型、复杂、高价值资产而言是完全不够的。在波音 747 研发过程中，航空航天领域开始寻求提高可靠性，并对当时公认的维修策略（即“老旧部件最有可能是罪魁祸首”）提出了质疑，并最终摒弃了它。

因此，航空制造商、运营商和美国联邦航空管理局组成了一个维修指导小组（maintenance steering group, MSG），专门负责分析航空航天领域的维修实践。这一举措产生了以可靠性为中心的维修（reliability centered maintenance, RCM）概念，其重点是提高可靠性、降低成本并采用良好的维修实践^[5]。在此基础上，世界各国在随后数年不断制定具体标准，目的是改善系统维修和整体调度成本^[6,7]。此类标准都承认 NFF 属于隐性故障，即在正常情况下操作人员无法明显发现的功能故障（系统的整体运行不受影响）。如图 1.3 所示，若只有部件 B 发生失效不会影响整个系统的功能，在部件 A 和 B 同时发生故障的情况下，系统功能才会受到影响。因为此类冗余方法无法为每个部件提供故障警报，所以此类故障属于隐性故障。如果功能故障并非隐藏状态，那么将其称为显性故障。

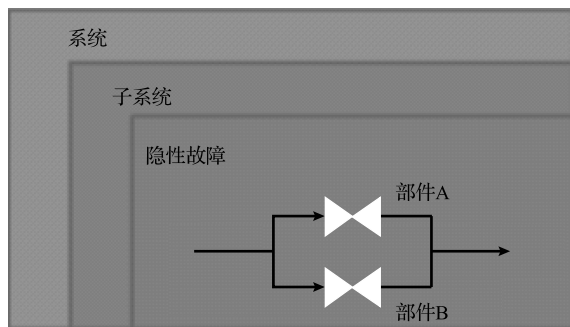


图 1.3 隐性故障

对现代工业而言，NFF 可能造成越来越多的计划外移除并导致巨大的资金浪费，已经成为一个专门的研究领域。如前面所述，系统复杂性不断增加的趋势及

其对维修项目成本的影响,是造成 NFF 问题如此重要的直接原因。此外,民用航空公司的商业文化也发生了变化,他们越发希望和提高飞机可用性的同时降低成本。在认识到目前还没有关于 NFF 的标准或程序后,民用航空公司开始根据自身的理解 and 需求来调整自身的维修实践,这也意味着各机构并没有统一的标准和术语来描述 NFF,并且这个问题还在持续恶化(术语统一问题参见第2章)。缺乏统一的通用描述性和标准性术语,也表明各方对 NFF 尚未达成一致理解,因此从技术和非技术的角度来看,这一问题必然会产生混淆。本书后续章节将进一步详细讨论更多细节。

在20世纪80年代至90年代,相关研究^[8-10]表明,行业普遍希望以更低的成本来实现更高的系统可靠性、可用性和维修性,并且利用新的故障处理流程、管理实践改进及新技术来提高自身在系统、子系统和部件等层面上的健康管理水平。随着设计工程师越来越重视维修性、可靠性和风险水平,环境和安全性问题成为需要通过立法解决的首要问题^[11,12],因此维修程序也必须进行完善。这一需求直接推动了状态监测、质量标准、专家系统这些技术的发展,同时以可靠性为中心的维修(RCM)这一新理念也开始流行起来。

很多飞机的使用时间都远远超过了其设计年限,各方都十分关注如何保持飞机持续适航性/安全性这一问题。日益增长的航空旅行需求极大地推动了各方开展安全性的研究,还对现有系统如何升级及必须在更低成本的基础上适应航空电子设备的进步提出了明确的要求。然而,由于飞机不断增长的总成本、日益紧张的维修预算和保持商业竞争力的需求,各大公司都在寻求实现利益的最大化,而在一定程度上忽视了自身的维修工作。这一时期,计划外移除次数明显增加。商业合同既不承认 NFF 这一问题,也没有相应的机制来计算其真实成本。因为没有明确的衡量标准和责任划分,NFF 导致大量资源浪费、非生产时间延长,还推高了维修成本、延长了机器停机时间,让系统无法正常工作。

航空电子设备日益复杂,导致 NFF 发生率不断增加。业内人士意识到,这个问题正在影响自身的声誉及供应链内的关系,因此需要提出一个解决方案。1998年,相关部门启动了可靠性改进方法和建模(reliability enhancement methodology and modeling, REMM)项目,目的是改善电子系统的可靠性。该项目使用一个统计模型来促进产品全寿命周期可靠性评估^[13,14],其中一个主要的成果是研究航空航天领域中 NFF 问题的根本原因,并对潜在原因进行全面分类。主要的问题原因清单如下:

- (1) 运营商政策(如较短的周转时间、备件可用性、机组人员任务优先级);
- (2) 失效记录/报告(如机组人员报告质量、数据编码不完善);
- (3) 维修实践(如维修人员培训、技术手册准确性);
- (4) 重复移除(如极少使用维修历史记录);

- (5) 车间效率(如生产吞吐压力、车间员工培训);
- (6) 测试覆盖范围(如跨维修层级的测试理念、测试全面性);
- (7) 结果解释(如故障代码解释、车间员工培训);
- (8) 间歇系统连接(如连接器的完整性、线束/绕组的完整性);
- (9) 含有间歇故障的产品(如焊点、印制电路板(printed-circuit board, PCB)问题);
- (10) 系统设计(如机内测试设备覆盖范围、软件容错)。

这些未发表的研究工作都强调了为系统设计人员制定实用指南的重要性,因为这种做法可减少当前和未来产品中的 NFF 问题。随着可靠性要求越来越高及商业合同类型更加完善,对高价值产品而言,保证固定故障率似乎已经不能满足最终用户的需求和政府的规定,尤其是在产品发生大量 NFF 问题的情况下。

2008 年,在 NFF 现有研究进展的基础上,航空航天领域以 ARINC 672—2008 标准^[15]的形式推出了一套程序,旨在建立一套解决 NFF 问题的结构化程序,同时给出了 NFF 的定义:某些维修流程中(车间或其他地方)因无法验证的原因导致的设备停用。

这份标准强调了 NFF 发生后的决策原则,明确了在部件维修周期早期采取管理行动的重要性。它进一步说明了应避免通过不必要地从飞机上拆除部件的方式来降低成本,同时强调了设计和生产阶段的要求标准的总体目标是开发故障容错率更高的系统并降低 NFF 发生率。该标准还进一步阐述了建立跨学科特征和设计方案的重要性,它们可用于任何工程设计或应用,包括通过模拟电子、机械和软件的相互作用,对 NFF 根本原因进行多学科建模。这一方法将从根本上推动设计指南与技术手册的完善,尤其聚焦于设计阶段须遵循的、从源头消除 NFF 问题的标准化流程。值得强调的是,该建模方法全面覆盖了精准故障模型构建、故障树分析、系统级理解等关键要素,尤其针对机内测试(built-in test, BIT)误警报问题(如传感器引发的虚警、系统同步异常等),提供了识别根本原因的技术路径。此外,为进一步完善设计规范体系,标准提出须将实际服务经验与设计知识深度融合,提炼形成具有指导性的正式标准,从而在系统全寿命周期内有效降低 NFF 发生率。为实现这一目标,相关合作企业须开展典型案例复盘与专家论证,最终形成系统性评估结论,为标准的科学性与可操作性提供支撑。

需要指出的是,有些问题即使尚未被人们提出,也可能同样具有一定的研究价值。其中,工业标准和人为因素是确保问题被正确识别、报告与解决的两大重要领域。最早提出 NFF 标准化呼吁的文献记录可以追溯到 1987 年,这一文献对电子设备测试性属性进行了研究,并专门用于解决 NFF 问题。然而,这一目标至

今还没能在测试/维修所涉及的各个层面上实现。最近的研究表明,阻碍诊断过程的主要原因是缺乏标准、信息不够清晰,以及分类方法使用不当。

进入 21 世纪,随着相关文献的发表,人为因素似乎再次受到重视。文献[16]~文献[18]详细说明了在故障诊断过程中人员缺乏培训和经验是如何影响 NFF 问题的。历史研究往往更加强调“软”因素,如人员沟通和培训等方面的问题,具体参见第 3 章。

总之,NFF 问题仍然存在,在飞机的有效维修中仍然属于重大问题。解决 NFF 问题,不仅需要受其影响的部门开展内部工作,还需要众多国际学术机构开展专门的研究工作。目前,各方并没有提出针对 NFF 问题的全面国际标准。术语不统一成了解决 NFF 问题的阻力,因此各方协调并使用基于通用术语和框架的维修标准是非常有必要的,ARINC 672—2008 标准是这个方向的一个积极进展。

1.1.3 无故障发现相关文献

在分析学术界文献的基础上,可以对 NFF 领域的现有学术研究成果进行评估,并根据 NFF 的研究方向对所有已发表文献进行分类^[19]。在 NFF 研究中,以下四大类别的影响最大:

(1)故障诊断,包括针对传感器、测试、故障排除、故障隔离手册、机内测试和环境测试的研究;

(2)系统设计,包括硬件和软件设计、反馈、关键性能指标、基准测试和成本权衡研究;

(3)人为因素,包括人员沟通、培训和教育、正确使用设备、保修索赔和问责;

(4)数据管理,包括数据趋势、电子日志和数据融合/挖掘。

在 1990~2013 年,共有 154 篇已发表论文专门针对 NFF,其中包括 38 篇期刊论文、84 篇会议论文,以及另外 32 篇 NFF 特定文献中引用的文章。以 38 篇主要的 NFF 期刊文章为重点,在图 1.4 中给出了出版物总数的增长趋势,从图中可以发现,这四个类别的出版物数量都呈现出类似的增长趋势。

NFF 文献数量增加,表明研究人员对这一问题的认识越来越深刻,研究主要目的如下:

(1)提高设备和飞机的可用性;

(2)缩短客机的周转时间;

(3)提供高效且经济的维修服务;

(4)减小 NFF 保修索赔的成本影响,特别是在消费电子和汽车行业。

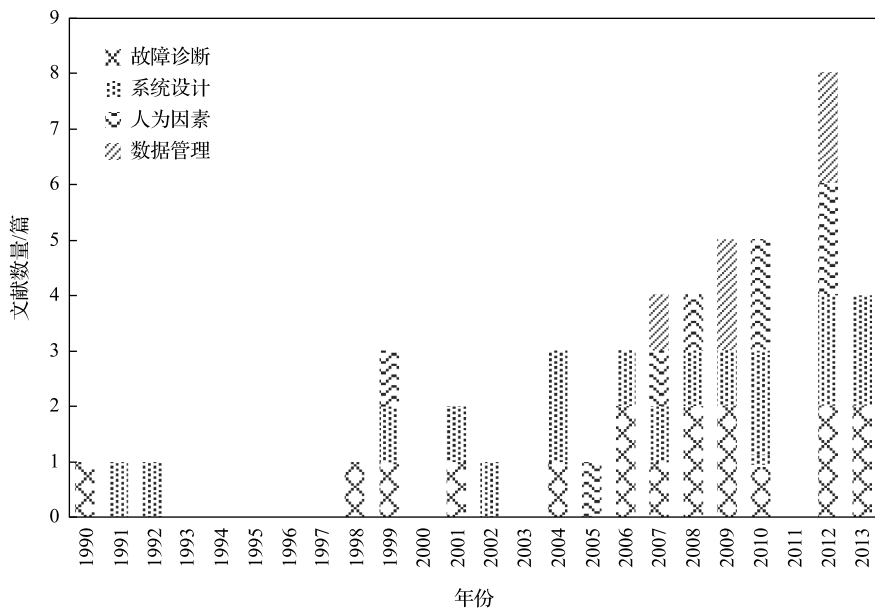


图 1.4 1990~2013 年与 NFF 有关的期刊出版物分类

更具体地说，有三股驱动力在发挥作用。第一股驱动力与竞争日益激烈的商业市场有关。因此，公司必然寻求成本节约的方法，浪费和低效的维修就成为降低成本的首要目标，NFF 作为巨大隐性成本之一成为必须解决的问题。同时，政府削减开支也大大缩减了备件采购经费，这就迫使公司和政府实现维修现代化和智能化。第二股驱动力是按可用性付费模式增加，即维护和修理属于第三方责任，第三方必须向客户保证设备或飞机具有特定的可用性。NFF 在签订这类合同方面发挥了重要作用，因为合同必须规定谁担负 NFF 的费用，如重新测试、重新认证等。第三股驱动力是工程系统复杂性增加及相关维修人员技能降低，这会增加诊断任务的复杂性，同样也会影响旨在消除人为错误的自动化诊断系统的推广。

一个有趣的结论是，近年来，尽管各方都承认 NFF 具有负面的成本影响，但是大部分研究关注重点似乎与系统可靠性、诊断设计和维修测试有关，而面向商业或与成本有关的文献数量却不多。

1.2 无故障发现现象

不同行业在使用 NFF 一词时意义具有很大差异，这一术语通常用于描述这样一种情况，即观察到了故障，但是以下一项或两项条件仍然成立：

- (1) 在相同条件下重复测试没有出现相同故障；
- (2) 检查发现没有能够导致已报告故障的现有条件。

图 1.5 是故障调查结论的传统分类。作为故障排除的结果，即确定了故障，运营商将一个航线可更换单元(line replaceable unit, LRU) (如发动机)从一架服役中的飞机上拆下送至维修商，同时说明移除原因(reason for removal, RFR)。维修商进而对该 LRU 进行检查和/或测试，根据发现将其分类为确认故障或 NFF。

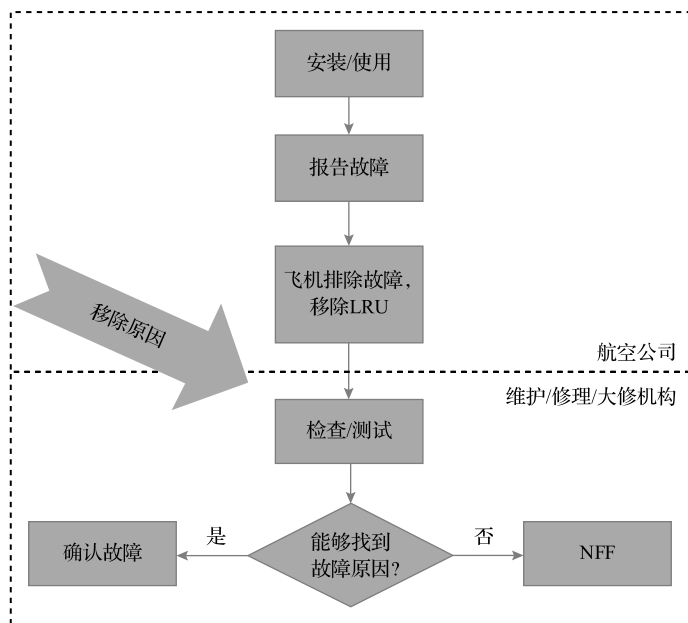


图 1.5 故障调查结论的传统分类

确认故障：维修商在 LRU 内部确认了某个故障，可能是硬件或软件故障，并且已知该故障能够导致该单元被移除。也就是说，LRU 可以从单元被移除追溯到一个明确的故障。

NFF：人们在 LRU 上没有发现能够导致该单元被移除的已知故障。在 LRU 返回维护/修理/大修机构后人们可能发现其存在故障，然而，若已知故障中没有一个是与该单元被移除有关，则应将其报告为次要故障，并且该单元的故障应归类为 NFF。

这种传统观点并不能反映出复杂维修项目中故障分类的实际情况。尤其是在考虑到可能存在错误移除，而故障仍留在飞机上的情况下，这一传统观点很难成立^[14]。图 1.6 给出了改进的 NFF 分类，其中引入了一个新的 NFF 类别，即非 LRU 导致的 NFF。

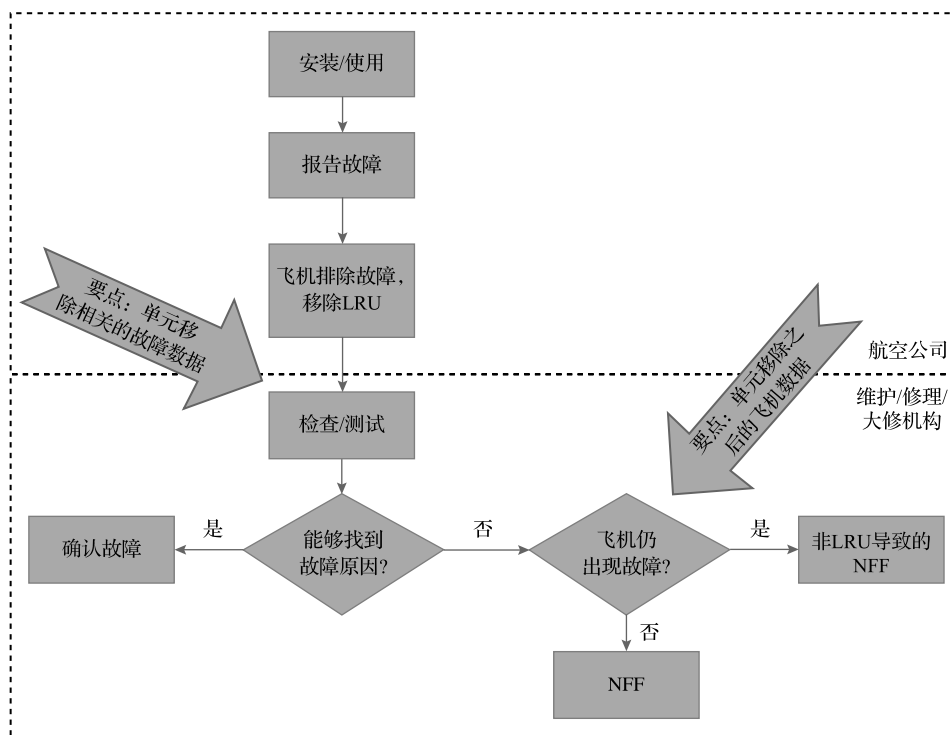


图 1.6 改进的 NFF 分类

非 LRU 导致的 NFF: 首先对移除后的相关数据进行逻辑分析, 并在这一分析的基础上进行推断, 对于被移除的 LRU, 其移除原因是成立的。

从本质上讲, 若某次单元移除满足以下两种情形之一, 则可视为非 LRU 导致的 NFF:

- (1) 在 LRU 移除后飞机仍有故障;
- (2) 同一故障排除实例中, 因同一故障而被移除的多个 LRU 中的某个目标 LRU 与另外一个 LRU 存在同样的故障。

从逻辑上讲, 若两个或两个以上 LRU 在同一故障排除实例中因同一故障而被移除, 并且其中某个 LRU 在检查和/或测试时发现与有相关的故障, 则考虑到移除的原因, 其余单元应认为是可用的, 此时可归类为非 LRU 导致的 NFF。

根据上述描述, 还有两种与 NFF 相关的关键场景, 即 NFF-故障和 NFF-无故障, 具体如图 1.7 所示^[20]。这两类场景非常不同, 需要本质上不同的方法来处理。NFF-故障是指 LRU 确实存在与报修原因对应的故障(机上故障成功排除)。若在没有解决这个故障的情况下将该单元重新投入使用, 则会继续表现出导致其最初被移除的相同故障, 换言之, 该单元是一个“惯犯”。此类情况大多为部件在使用