国防电子信息技术丛书

Reliability, Maintenance and Logistic Support
A Life Cycle Approach

可靠性、维修与后勤保障
——寿命周期方法

[印] U Dinesh Kumar 等编

刘庆华 宋宁哲 等译

電子工業出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
http://www.phei.com.cn

国防电子信息技术丛书

可靠性、维修与后勤保障——寿命周期方法

Reliability, Maintenance and Logistic Support
A Life Cycle Approach

[印] U Dinesh Kumar 等编

刘庆华 宋宁哲 等译

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书的主要目标是为可靠性、维修性和后勤保障分析提供一套完整的方法，介绍的大多数资料都经受了各类学者的长期检验，包括全世界多个国家的工程技术人员和高层管理干部。本书共12章，第1章论述可靠性、维修性和保障性(RMS)的概念，以及它们在产品成功和寿命周期可用性中的作用；第2章介绍概率论、随机变量和概率分布的概念；第3章说明许多有用的可靠性度量方法；第4章分析基本的数学工具，用来预计串联、并联、串并联、复杂和网络系统的可靠性；第5章讨论基本的维修性和维修概念，还介绍了维修性度量方法、维修等级和维修分类；第6章以飞机发动机的案例讨论以可靠性为中心的维修，与寿命有关的维修的维修模型和最佳化程序；第7章至第9章论述保障性问题；第10章探讨可用性问题；第11章讨论一些比较传统的经典方法，比如可靠性、维修性和保障性分配，失效模式影响和严酷度分析(FMECA)，故障树分析(FTA)，容错软件(FTS)和寿命周期费用(LCC)；第12章介绍了各种方法，来估计失效前时间、修复时间和保障时间分布的类型和参数。

本书适用于所有工科院校各年级的大学生，也可作为各类工业部门的可靠性、维修性和保障性工程师的参考书。

版权贸易合同登记号　图字：01－2009－2733

图书在版编目(CIP)数据

可靠性、维修与后勤保障：寿命周期方法/(印)库玛(Kumar, U. D.)等编；刘庆华等译. —北京：电子工业出版社，2010.1
(国防电子信息技术丛书)
书名原文 Reliability, Maintenance and Logistic Support: A Life Cycle Approach
ISBN 978-7-121-08721-9

Ⅰ. 可…　Ⅱ. ①库…②刘…　Ⅲ. 可靠性管理　Ⅳ. TB114.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第065272号

策划编辑：谭海平
责任编辑：侯丽平
印　　刷：北京丰源印刷厂
装　　订：三河市万和装订厂
出版发行：电子工业出版社
　　北京市海淀区万寿路173信箱　邮编 100036
开　　本：787×1 092　1/16　印张：17.75　字数：454.4千字
印　　次：2010年1月第1次印刷
定　　价：49.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线：(010)88258888。

译 者 序

可靠性、维修性和保障性对于增强产品竞争力具有特别重要的意义。本书的主要目标是为可靠性、维修性和后勤保障分析提供一套完整的方法。书中不仅探讨了改进设计过程的途径，保证产品提供更好的经济价值，还考虑了经营者一旦投入使用，如何通过这些产品获取最大效益。寿命周期费用分析对于综合可靠性、维修性和保障性，从而增强产品性能和增加销售机会具有特别重要的意义。因此，本书的翻译出版对我国军事装备和国民经济重要产品的可靠性、维修和后勤保障具有重要的参考价值。

本书是在空军雷达学院主持下，在电子工业出版社大力支持配合下，由 20 多位专家学者和工作人员辛勤劳动而完成的。本书翻译和组织工作主要由空军雷达学院刘庆华副教授、宋宁哲副教授、刘根副教授、空军第二研究所杨秉喜高工完成，他们不仅参与了翻译，还负责全书的审定，对译文质量的提高发挥了重要作用。另外，中国电子技术标准研究所杨启善高工参与了部分翻译、审定和组织工作。

参加本书翻译工作的还有：黄卿贤、方其庆、姜朝毅、邓斌、李洪力、胡冰、李刚、何英、杨晓光、杨光、龙军、肖小峰、刘俊荣等。

另外，沈杨工程师、王殿东总经理、潘小虎销售总监、陈健、张雪胭、王杰、赵晓林对本书部分章节提出了修改意见，在此对他们表示感谢。

最后，我们还要对电子工业出版社有关工作人员表示感谢，他们为本书的出版付出了辛勤劳动，没有他们的努力，读者是看不到这本书的。

由于译者水平有限，书中错误之处在所难免，敬请读者批评指正。

译 者

2009 年 12 月

前　言

每一项伟大事业都必然有一个开端。

——Francis Drake

正当我们撰写这篇前言时，2000 年一级方程式汽车拉力赛刚刚开始几天。这时许多汽车发生故障而退赛。经常看到这样的标语："要想争第一，首先必须完成比赛"。一级方程式汽车及其美国兄弟 Indy500 汽车代表了汽车工程设计的顶级水平——它们都具有气动、高速、轻便、可手工操纵、动力大、安全等特性。然而，这类汽车并不追求数十年的长寿命。如果它们经受 200 ~ 500 英里之间的竞赛，而不需要超过 10 秒钟的维修时间，仍能认为它们符合要求。同样，战斗机并不期望在高空航行，以超音速一天飞行 18 小时；反之，客机也不像战斗机那样希望在低于 80 m 的高度、推力在 -4.5 G ~ +9 G 之间以 2 马赫每小时的速度飞行。然而，可以说这两种类型飞机的所有者都希望以最少的寿命周期费用保持最高的可用性，二者还希望净载量大、航程远、耗油低、维修少、保障少、安全性好、可靠性高。

可靠性、维修与保障性对于增强产品竞争性具有特别重要的意义，制造费用对于产品的成功固然很重要，但降低成本对于实现其起码竞争性并不是唯一方面，改进制造和运行质量及性能也可以降低采购费用，所有者的运行费用对于商业成功也是重要的。设计的早期阶段对于提升可靠性、维修性和后勤保障提供了最佳机会，从而提升寿命周期的可用性。

本书的主要目标是为可靠性、维修性和后勤保障分析提供一套完整的方法。我们不仅探讨能够改进设计过程的途径，保证产品提供更好的经济价值，我们还要考虑经营者一旦投入使用，如何从这些产品获取最大效益。寿命周期费用分析对于综合可靠性、维修性和保障性，从而增强产品性能和增加销售机会具有特别重要的意义。

本书包括下述目标：

（1）介绍可靠性、维修和后勤保障的概念，以及它们在系统寿命周期可用性中的作用。

（2）介绍基本概率论和统计技术，以及它们对于建立可靠性、维修性和保障性问题模型的重要性。

（3）说明可靠性度量方法，如何预计可靠性，如何根据现场数据确定可靠性，如何使用可靠性度量方法。

（4）分析先进的可靠性模型。

（5）讨论基本的和先进的维修概念，包括预防性维修、修复性维修以及基于实际状况维修。

（6）研讨维修管理和最佳化概念，比如以可靠性为中心的维修、与寿命有关的维修。

（7）描述保障性、综合后勤保障的基本概念。

（8）提供可靠性、维修性和保障性的设计技术。

（9）备件预测和最佳化中的简化模型和先进模型分析。

（10）探讨数据分析、数据管理和数据简化技术。

本书第 1 章论述可靠性、维修性和保障性（RMS）的概念，以及它们在产品成功和寿命周

期可用性中的作用。利用阿波罗 13 案例研究来说明设计期间和运行阶段可能影响产品可靠性的某些问题。

第 2 章介绍概率论、随机变量和概率分布的概念。特别是利用诸如指数、正态、威布尔、伽马和对数正态分布寻求描述失效前时间、修复时间和保障时间的方式，以及如何利用这些理论提供更好的 RMS 模型。

第 3 章说明许多有用的可靠性度量方法，包括失效函数、可靠度函数、风险函数、平均故障间隔时间（MTBF）和无维修使用期（MFOP）。讨论了这些度量方法的特性和应用。探讨如何利用这些度量方法提供更有意义的可靠性水平度量。引入寿命交换率矩阵（LERM）概念，说明系统中的所有元器件没有相同的负荷周期，LERM 提供了归一化单位来度量系统的寿命。

第 4 章分析基本的数学工具，用来预计串联、并联、串并联、复杂和网络系统的可靠性。利用许多真实事例进行说明，介绍了对飞机发动机的案例研究。

第 5 章介绍基本的维修性和维修概念，还介绍了维修性度量方法、维修级别和维修分类。此外，还介绍了维修方针，比如修复性维修、预防性维修和基于实际状况维修。而诸如以可靠性为中心的维修、与寿命有关的维修的维修模型和最佳化程序，将在第 6 章以飞机发动机的案例研究加以讨论。

第 7 章至第 9 章论述保障性问题。第 7 章描述保障性在产品寿命周期中的重要作用，并介绍保障性度量方法。第 8 章讨论几个用来预测备件需求的模型，特别是，我们调查了使用和不使用泊松模型、更新理论、边界分析和蒙特卡罗模拟的优点和缺点。第 9 章论述综合后勤保障（ILS），利用英国航空公司和飞机发动机的案例研究成果，来说明本章讨论的一些概念。

第 10 章探讨可用性概念，如固有可用性、运行可用性和可达可用性，还分析可靠性、维修和后勤保障对可用性的影响，以及探讨不同的维修和保障方针如何有助于充分发挥系统的潜力。

第 11 章讨论一些比较传统的经典方法，比如可靠性、维修性和保障性分配，失效模式、影响和危害度分析（FMECA），故障树分析（FTA），容错软件（FTS）和寿命周期费用（LCC）。

本书最后一章介绍了各种方法，来估计失效前时间、修复时间和保障时间分布的类型和参数，论述了某些标准方法，包括均值和中位秩回归估计及极大似然估计。我们还探讨如何从业务数据获取最多信息，以及利用这些信息论证可靠性和维修要求。

本书介绍的大多数资料都经受了各类学者的长期检验，包括全世界多个国家的工程技术人员和高层管理干部。本书适用于所有工科院校各年级的大学生。本书也可作为各类工业部门的可靠性、维修性和保障性工程师的参考书，这些人员负有安全有效地运行、维护和保障复杂系统的职责。

正如波音 777 飞机分部总经理 Alan Mulally 经常就自己的能力所说：我们的能力发挥到了何种程度？的确，本书还能够改进，我们期望收到学生们、老师们和实践者的批评意见。我们希望读者通过阅读本书增加知识，加深理解并获得快乐。

印度加尔各答管理研究所　　U Dinesh Kumar

英国米尔思高等专科学院　　John Crocker

英国米尔思高等专科学院　　J Knezevic

英国米尔思高等专科学院　　M El-Haram

目　录

第1章　可靠性、维修性和保障性导论

关于战争或生活，我们所要做的就是努力从我们已知的，去发现我们未知的。

——Wellington 公爵

1.1　引言

自250年前开始的工业革命以来，顾客始终要求得到更好、更快、更便宜的产品。而这一点或多或少需要产品具有更好的可靠性、维修性和保障性（合称RMS）。自企业开始为顾客提供产品之日起，他们的顾客也始终希望，能确认自己没花冤枉钱，买到的产品物有其用，价有所值。

今天的顾客心理也是如此。和以前不同的是：公司规模更大，产品更加完善、复杂，价格更高，顾客要求更高且更加谨慎。和其他形式的发展一样，在企业也同样存在“红皇后综合症”（Carroll，L. 1871，Ridley，R. 1993）：要想站得稳，首先就得跑得更快。即使某种产品生产得再好，它也不可能永远是最好的。

用户希望产品性能始终良好，寿命周期使用成本为零，从产品到货直到报废前，100%可完全使用。这就要求产品的设计师、生产商、供应商、制造商努力接近这一极限，或者至少比同类产品更接近。但是，多数情况下，只向（潜在）顾客宣称产品能实现上述要求是远远不够的，还必须出示可验证的证据来证实这些。在本书中，我们希望能提供相关方法和技术，帮助实现上述目标。并辅以实例来解释应如何运用这些方法和技术。

企业成功取决于其产品及工业流程的有效性。所有生产出来的产品都应具有其特定功能。客户或用户都希望该产品能始终保持其功能性，直到完成其使命；或者即使不能始终保持其功能性，至少应尽可能长时间保持。如果产品能控制在最少维修或最快速维修、最少中断正常运行、最少技术支持和最小相关支出，当然就更好了。随着消费者对于产品的质量、可靠性及可用性的意识和要求的不断提高，企业也承受着更大压力，必须生产出符合消费者要求的产品。多年来，很多企业一直注重优化技术和流程，其中一些也为此颇为自豪。这些企业中大多数之所以能够生存下来，也正是因为其产品具有很高可靠性，面向市场需求，实现了消费者的期望。

飞机、火箭、核潜艇、火车、公共汽车、轿车、计算机等复杂设备的运行，就像一支交响乐队。不同部门的工作人员协同努力，以实现整个系统的最大有效性。这些设备的成功运行背后，一些内在特性（设计参数）起到了至关重要的作用。其中三个特性为可靠性、维修性和保障性（合称为RMS），它们是整个系统能否正常运行的决定性因素。每年，仅因为系统的低可靠性、缺乏维修性和保障性，军队机构和地方公司就要花费数十亿美元。

现代工业系统由多种复杂、高精密的元件组成，但与此同时，用户始终期望系统运行无故障。一架波音777共有大约600万个零部件，其中一半是螺母、螺栓或铆钉，还有30多万个是专用的零部件。如此复杂系统的成功运行、维护和保障，需要一整套的工具、程序和技术。如

果不能实现高可靠性、维修性和保障性，将会损失惨重、影响巨大。一架波音 747 一天不能正常运行，仅收入一项就要蒙受高达 30 万美元的损失。如果不能按时发送航班或者因故取消航班，那么涉及的损失不仅有调整航班的开支，还有机组人员成本、乘客安置成本和损失客流收入等。相应地，这也将影响相关航空公司的竞争力、盈利水平和市场份额。所以，民用航空公司可能最怕听到“飞机搁地”。同类事件对军用航空公司的成本和影响虽然会有不同，但相信他们也不希望飞机不能正常起降。

图 1.1 显示了造成波音 747 在长期的飞行中延误的各种因素（Knotts 1996），其中因技术问题造成的航班晚点和取消占 20%。不同机型飞机延误后每分钟的支出，包括人力成本、机场收费、空中交通管理的支出、重排航班的费用，以及旅客的餐食、住宿、交通及赔偿等开支。

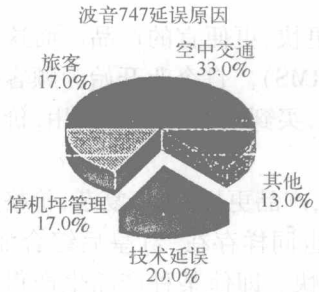

图 1.1　波音 747 延误原因

各大企业在总结经验的基础上，利用前沿科研成果，不断提高着产品的安全可靠性。美国宇航局、波音、空中巴士、洛克希德马丁、罗尔斯-罗伊斯、通用电气、普拉特·惠特尼，以及其他很多企业生产的产品都具有相当高的可靠性。例如，在美国，25% 的喷气式飞机已经飞行长达 20 年，其中 500 架已飞行长达 25 年，接近甚至超出原定的设计寿命（Lam, M. , 1995）。更为重要的是，这些飞机目前依然可以安全可靠地飞行。当然我们不能因此而自满，因为即使再好的企业也可能遭遇不顺。阿波罗 13 号的失败、1986 年挑战者号的不幸，这些我们很多人仍记忆犹新。

顾客的要求总是高于制造商的能力范围。有时这些要求甚至超出了现实可能性或理论可能性。例如，Hockley 等在 1996 年，Dinesh Kumar 等在 1999～2000 年提出的新可靠性要求《维修性及无故障使用期》。高可靠性当然是理想的一种功能，维修性和良好的综合保障性也是如此。只有通过这三点特性，才能降低寿命周期费用，同时提高可用性水平。

战斗机是昂贵的，飞行员也是如此，因此，指挥员不想损失任何一方。同时，雇用的大量地面维护和保障兵力还需要大量花费，且有潜在危险。因此，经营者寻求制造厂生产可靠的飞机，能够不做任何维修而工作数周，对此要求并不令人惊奇。然而问题是我们能够达到必要的可靠性水平吗？能够以足够的置信度、合理的经费满足这一要求吗？

诸如超级可靠飞机（URA）和未来空中攻击系统（FOAS）等最近的项目对可靠性要求增加了新的内容。用户希望有一个无维修使用期（MFOP），在此期间，系统需要维修的概率非常低。在每个周期之间，将进行充分维修，确保系统以同样的概率进入到下一个无维修使用期。时间可以告诉我们是否采用这一方针，不容置疑的是：MTBF 的天数及其倒数（恒定失效率）是可以计算的。数学和概率论学科慢慢发现它们进入售后市场的途径，并且需要受过更好教育的人才来理解这些新概念、新技术和新方法。另外，不仅影响军用飞机，而且所有产品的购买者都需要得到更高的经济价值，当然，不只是购买时，而是期望在整个寿命期间实现。不可靠产品的制造者应对他们的方针、过程和财务进行反思。

1.2　系统的寿命周期

任何工程设计实践的基础是对产品从生到死的寿命周期的理解。寿命周期开始于新系统

想法诞生时刻，结束于系统安全地处置时刻。换言之，寿命周期开始于对需求和要求的初始确认，并通过规划、研究、设计、生产、评价、运行、维护和保障而延伸，直到寿终正寝（如图 1.2 所示）。

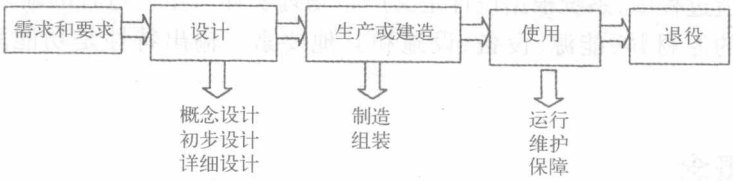

图 1.2　系统的寿命周期

专门生产军用设备的制造商经常直接或通过咨询“投标”来了解最新的国防要求。对于大多数其他制造商，一般通过调查潜在市场需求，并确定他们能否以合理方式满足需求。英国国防部与航空工程学士系统一起组成咨询组（包括英国国防部与皇家空军的代表），对所有现有攻击系统，包括友方和敌方的空防系统进行研究，包括在超级可靠飞机（URA）研究项目中作为实践识别的所有概念。另外，空中客车工业公司根据他们持续的市场研究认为，对于载客超过 500 人的远程飞机，有着大量的市场需求，至少要能跨过太平洋从东京到洛杉矶，甚至能够在伦敦和悉尼之间不停顿飞行。要多年以后我们才知道这些飞机能否飞上天空，要证明生产商的成功则需要更长时间。

第 1 个过程是识别对新系统的需求和要求，并将要求转换为技术含义的定义。对新系统需求的主要原因是执行新的功能（也就是对于具有规定功能的产品存在新的市场需求），或者现有系统有缺陷。缺陷类型有：①功能缺陷，②性能不够，③特性不够，④可靠性差，⑤维修和保障费高，⑥销售量少，因而利润低。

概念设计阶段的第 1 步是分析功能需求或缺陷，并将其转换为更专业的一套定性和定量要求。这种分析可形成概念性的系统设计备选方案。概念系统设计过程的流程如图 1.3 所示（D. Verma 和 J. Knezevic，1995）。这一步的输出作为初步设计阶段的输入。概念设计阶段是协调可靠性、维修性和保障性的最佳时间。例如，在未来空中攻击系统（FOAS）案例中，有用户、供方和学术界代表的各个集成项目小组共同提出新的理念和目标，尽管难以实现。这种活动的重大成果有，产生了无维修使用期概念，诞生了无人攻击空中平台（UCAC）。

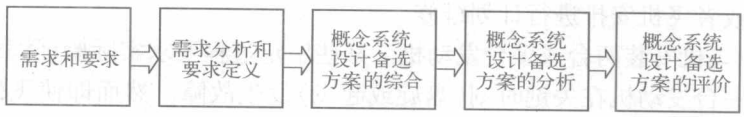

图 1.3　概念系统设计过程

初步设计阶段的主要任务是系统功能分析，诸如运行功能、维修功能、性能和有效性因素的分配、系统保障性要求的分配（Blanchard，1991）。这时要将概念通过技术开发实现理念深入贯彻下去，要求各项目组尽可能把理念纳入技术开发程序或舍弃。

详细设计阶段的主要任务是：①系统/产品设计开发，②系统样机研制，③系统样机试验和评价。设计是产品寿命周期中最重要和最关键的阶段。可靠性、维修性和保障性依赖于设计，并且对运行可用性和费用有重要影响。这一阶段能够进行安全性、可靠性、维修性验证，并能

根据验证结果制定维修和保障计划。

生产/建造过程是开展的一系列活动,以便把新系统的全部技术定义转换为物理实体。这一过程的主要任务有:①主要系统单元的制造/生产/试验,②系统评定,③质量保证,④系统改进。在生产/建造过程中,系统根据设计定义产生物理实体。生产过程的输入特性有,新系统生产/建造需要的原材料、能源、设备、设施和其他要素。输出特性是功能系统的完整物理实体。

1.3 故障概念

正像英语中许多词汇那样,故障对于许多人来说具有多种含义。系统故障本质上是造成系统丧失功能性的任何事件或事件的集合,功能性是产品的固有特性,与产品在规定条件下按照规定要求完成规定功能的能力有关(Knezevic,1993)。这样说来,系统或其中任何组成部分只能处于两种状态:功能状态或故障状态。

在许多情况下,在两种状态的转换是瞬间完成的,比如挡风玻璃破碎、轮胎扎破、叶片破裂、晶体管烧坏等,这些都没有足够时间检测故障的发生和预防后果。然而在其他许多情况下,两种状态的转换是缓慢的,比如轮胎或轴承磨损、操作盘上裂纹的扩展、叶片变形或性能开始下降等。在这些情况下进行某种形式的监测可以使使用者采取预防措施。定期检验轮胎外面花纹的多少,观察润滑油的残留量,使用光学孔径检查仪检验观察裂纹,使用某些形式的趋势仪(如卡尔曼过滤)监测规定的油量消耗,就能在故障即将发生时向使用者报警。同理,可以对零部件使用任何形式的非破坏性试验作为监测手段,这些零部件在包含它们的单元恢复期间已经暴露,以便检查可能引起该零部件不能工作的因素,比如损坏、退化、磨损、腐蚀,或任何其他可视痕迹,或物理上可探测的征兆。

还有许多更复杂的系统,其故障可能产生严重的或致命性的后果,不管这种可能是否发生,都要采取措施来消除这种故障。小轿车配置有双刹车系统,飞机至少具有三重液压系统和若干其他冗余装置。在这些情况下,可能出现零部件故障而无系统故障。故障产品通过维修而恢复,虽然可能延误时间,但系统将以高概率持续安全地运行一段时间。如果飞机上的一台飞行控制计算机发生故障,其功能就立即自动地被另一台计算机取代。一般允许连续不间断地飞行到下一个计划的目的地。根据冗余水平和法规规定,允许飞机继续飞行,直到另一台计算机发生故障,或者飞机安排进行计划维修。

大多数商业飞机安装两台或多台发动机。某些鉴定过程要求实际验证满载飞机能够安全起飞,即使其中一台发动机在关键时刻(盘旋或起飞)发生故障。然而即使飞机能够用一台发动机飞行,一旦飞机着陆了,在飞机发动机恢复到功能状态之前(非常特殊情况例外),决不允许再起飞。由于适航性规则的更改,最新大型双发动机飞机(例如空中客车 330 和波音 777)允许飞行中一台发动机熄火后再飞行一段时间,一般是指正式规定在海上可双倍时间飞行,或者非正式规定发动机转向或客机滑行。这就是确定飞机在飞行中任何时刻从适合着陆位置能够再飞的最大距离(用飞行分钟表示)。还要求飞机失去发动机后立即转变航向在该时间内飞到着陆场。飞机着陆后在它恢复两台能工作的发动机之前,不允许再起飞。在这种情况下,没有一个发动机是真正冗余的,而且系统(飞机)具有有限的容错水平。

大多数个人计算机具有完整的硬盘,在计算机寿命期间,一小部分硬盘变得不能使用并不

少见。如果这一部分没有保存存取文件或关键系统文件，计算机不仅能够检测出这些部分，而且能够显示出不能使用，不再写入任何数据。可惜的是，如果在这些部分变得不能使用之前已存有数据，也不再能够存取，通过特殊软件，有可能得到部分恢复。这样，装入计算机内置测试软件就能提供一定容错能力，通常使用者整体上看不出来，至少在整个硬盘崩溃或故障影响到程序或数据的关键部分之前看不出来。即使在这种情况下，如果程序或数据复制到另一个盘/存储介质，通过一定的人工干预，系统即能恢复全部功能。所以既要有容错功能，又要有冗余，后者通常由使用者决定。

1.4　阿波罗 13——案例研究

1968 年 3 月 14 日，美国宇航局分包商运送冷冻氧气瓶到加利福尼亚组装，然后安装到宇宙飞船执行任务，其中包含设计仅 28 V 的温度自动调节器。后来由于地面程序加重了这一缺陷的影响，使氧气瓶过热，并破坏了保护内部布线的绝缘体。1970 年 4 月 13 日升空 55 小时 54 分 53 秒距离地球约 2 00 000 英里执行任务，回答地面例行每日询问时说，开关冷冻风扇时引起氧气瓶内晃动，产生的火花点燃了绝缘材料，温度升高、压力增大，导致氧气瓶爆炸。瓶内的液氧瞬间蒸发成气体，充满了服务舱的 4 个隔间，冲击了飞船装有轨道高增益天线的外壳，造成了指令舱失去赖以呼吸的氧气和动力。迫使 3 名宇航员从指令舱爬入登月舱避险，并困在登月获得的 Beech 舱中 80 多个小时，直到溅落前仅几小时（译注：直到 4 月 17 日“阿波罗 13”历尽艰险，终于平安地溅落在太平洋中，宇航员全部获救）。

阿波罗宇宙飞船的电气系统设计成工作在 28 V 电路中。所以，当北美第一次签订氧气瓶合同时，他们被告知温度自动调节器开关，就像飞船上的其他开关和系统那样，要制造得适用于宇宙飞船的 28 V 电源网。然而，这个电压并不是接受的唯一的电压。在发射前数周和数月期间，飞船耗费许多时间连接到位于卡纳维拉尔角的发射台的发电机上，以便设备在飞行前运转。使用的发电机是能充 65 V 的直流发电机。在进行这次试验时，北美担心飞船发射之前，高压会烧烤冷却瓶中灵敏的加热系统，并决定更改规范。通知分包商更改原来的加热装置，并更换整个加热系统。奇怪的是，工程师疏忽了对温度自动调节器开关规范的更改，在新的 65 V 加热器上保留了原来设计的 28 V 开关。虽然有 Beech、北美和 NASA 技术人员的严格控制，这一差错还是未能发现。

装到阿波罗 13 的有缺陷的氧气瓶曾经运到位于加利福尼亚 Downey 北美工厂，在那里，它们装上金属护甲和外壳并安装到 106 服务舱，计划 1969 年执行阿波罗 10 飞行任务。由于氧气瓶的设计增加了技术改进，工程师决定从阿波罗 10 服务舱拆下现有的氧气瓶，并用较新的更换。安装到飞船上的氧气瓶得以升级，并安置在另一服务舱，供另一次飞行使用。从阿波罗飞船拆下冷冻瓶是一项精细的工作。由于几乎不可能将任何一个瓶与复杂的相连的管道和电缆分开，整个外壳连同所有相连的硬件都必须加以拆卸。为此，技术人员系上绳索到达外壳边沿，卸开 4 个螺栓并拉出了组件。1968 年 10 月 21 日罗克威尔工程师卸开宇宙飞船的氧气瓶外壳，开始小心地从飞船起吊它。吊车工并不知道 4 个螺栓中的一个已经升高脱离位置，当吊车电动机启动时，捕捉住螺栓之前，外壳升高只有 2 英寸，吊车一打滑，外壳就回落到原处。回落产生的撞击很小，但与之有关的程序是明显的。工厂流程的任何事故，不管其影响多么小，都需要检验涉及的宇宙飞船的零部件，确保它们没有受到任何损坏。回落的外壳中的氧气瓶