



21世纪交通版高等学校教材

工程机械可靠性

Construction Machinery Reliability Engineering

吴永平 编 著



人民交通出版社
China Communications Press

21 世纪交通版高等学校教材

Gongcheng Jixie Kekaoxing

工程机械可靠性

吴永平 编著

人民交通出版社

内 容 提 要

本书共分九章,内容包括可靠性数学基础、可靠性指标及计算、可靠性设计、可靠性试验与统计分析、技术诊断及预测、故障分析基础,以及工程机械使用可靠性和可靠性管理等。本书可作为高等学校工程机械专业方向的本科教材或教学参考书。本书也适用于从事工程机械产品开发设计、制造、使用维护及管理工作的技术人员和经营者。

图书在版编目(CIP)数据

工程机械可靠性/吴永平编著. —北京:人民交通出版社,2009.7

ISBN 978-7-114-07710-4

I. 工… II. 吴… III. 工程机械—可靠性 IV. TU601

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 057642 号

21 世纪交通版高等学校教材

书 名: 工程机械可靠性

著 作 者: 吴永平

责任编辑: 韩亚楠

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址: <http://www.ccpress.com.cn>

销售电话: (010)59757969, 59757973

总 经 销: 北京中交盛世书刊有限公司

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京凯通印刷厂

开 本: 787 × 1092 1/16

印 张: 10.5

字 数: 254 千

版 次: 2009 年 7 月 第 1 版

印 次: 2009 年 7 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978 - 7 - 114 - 07710 - 4

印 数: 0001—2000 册

定 价: 20.00 元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

21 世纪交通版

高等学校教材编写委员会

机械设计及其自动化专业(工程机械方向)

主任委员: 冯忠绪(长安大学)

委 员: (以姓氏笔划为序):

马桂秋(辽宁省交通高等专科学校)

卢和铭(长沙交通学院)

刘晓婷(长安大学)

朱茂桃(江苏大学)

闫佐廷(辽宁省交通高等专科学校)

李自光(长沙交通学院)

张春阳(南京交通职业技术学校)

张小龙(西安建筑科技大学)

张海英(内蒙大学职业技术学院)

张福生(太原重型机械学院)

谷立臣(西安建筑科技大学)

单绍福(山东交通学院)

陈 勇(山东交通学院)

杨晓卫(江苏大学)

杨 平(福建省交通职业技术学院)

郭小宏(重庆交通学院)

徐格宁(太原重型机械学院)

曹源文(重庆交通学院)

崔崇学(内蒙大学职业技术学院)

秘 书: 焦生杰(长安大学)

赵 蓬(人民交通出版社)

前 言

产品可靠性是产品的基本质量指标之一,并决定着产品在市场中的竞争能力。高性能与高可靠性是现代产品的基本特征。自第二次世界大战以来,可靠性的研究无论是在理论方面,还是在应用技术方面都得到了深入的研究与发展。可靠性工程已成为现代工程技术人员的一门必修课。

工程机械可靠性或称工程机械可靠性工程,是关于工程机械产品寿命周期各个阶段可靠性问题研究的应用性学科,是应用可靠性的一般原理和方法,结合工程机械领域的具体实践而形成的一整套理论与方法体系。工程机械可靠性还处在发展阶段,希望通过本书的出版能够起到抛砖引玉的作用,能够鼓励更多的技术人员从事工程机械可靠性研究工作,并不断取得应用研究成果,达到大力提高我国工程机械产品质量之目的。

本书以工程机械产品寿命周期各个阶段为主线,系统地叙述了产品在设计、制造、使用以及管理等方面的可靠性知识、方法和研究成果,书中内容是作者多年从事教学科研工作的积累,同时也引入了一些国外在工程机械可靠性方面的研究成果。编写本书的目的主要是为工程机械领域的本科生及研究生提供参考教材,也可作为提高工程机械领域技术人员可靠性知识水平的学习材料。

本书的内容主要包括可靠性数学基础、可靠性指标、可靠性设计、可靠性试验、故障分析基础、技术诊断、预测及可靠性管理等方面。由于作者水平有限,书中难免出现错误之处,敬请读者批评指正。

作 者

2008 年 8 月于长安大学

目 录

第一章 概述	1
第一节 可靠性基本概念与内容	1
第二节 可靠性与产品质量	4
第三节 可靠性学科发展概况	5
第二章 可靠性数学基础	8
第一节 随机事件与概率	8
第二节 随机变量及其数字特征	11
第三节 机械可靠性常用概率分布	14
第三章 可靠性指标及计算	22
第一节 可靠性概率指标	22
第二节 可靠性寿命指标	27
第三节 可修复产品的维修性指标	28
第四节 可修复产品的马尔科夫过程	31
第四章 可靠性设计	34
第一节 可靠性设计方法与程序	34
第二节 系统可靠性设计	37
第三节 系统可靠性分配	41
第四节 零件可靠性设计	42
第五节 典型构件及零件的可靠性计算	46
第六节 可靠性设计中的安全系数	49
第七节 典型零件寿命计算	51
第五章 可靠性试验与统计分析	58
第一节 概述	58
第二节 加速寿命试验	59
第三节 数理统计基础	62
第四节 参数估计	68
第五节 指数分布的寿命试验及参数估计	71
第六节 假设检验	77
第七节 可靠性试验设备	79
第八节 可靠性抽样试验	80
第六章 技术诊断及预测	82

第一节 概述	82
第二节 技术诊断的信息论基础	83
第三节 诊断特征量的确定	86
第四节 诊断方法及其特点	88
第五节 技术状态预测	91
第六节 工程机械技术诊断概述	99
第七章 故障分析基础	104
第一节 故障分类与故障模式	104
第二节 基本失效模式	105
第三节 影响机械零件失效的因素	108
第四节 失效分析的基本方法	109
第五节 故障模式影响及危害性分析	113
第八章 工程机械使用可靠性	125
第一节 技术保养周期的确定	125
第二节 维修周期的确定	127
第三节 使用可靠性指标计算	130
第四节 工程机械的经济使用期	131
第五节 整机可靠性	133
第六节 提高可靠性的方法与措施	136
第九章 工程机械可靠性管理	139
第一节 概述	139
第二节 使用阶段的可靠性管理	142
第三节 备件库存的可靠性管理	144
第四节 可靠性管理中的人员管理	146
附表 1 正态分布表	147
附表 2 样品容量、失效数与置信度的关系正态分布表	149
附表 3 χ^2 分布上侧临界值表	151
附表 4 t 分布双侧临界值表	153
参考文献	155

第一章 概 述

第一节 可靠性基本概念与内容

机械产品在使用过程中能够可靠运行,在封存、运输期间能够保持良好的技术状态,这是现代产品应该具有的基本属性。只有在保证较高可靠性的条件下,机械设备才有可能发挥出其所具有的最大效能,可靠性对于各类产品均具有十分重要的意义,它决定着现代工程机械的使用效率和安全性。

一、可靠性基本概念

1. 可靠性定义

按照国家有关标准,可靠性(Reliability)的定义为:产品在规定的条件下和在规定的时间内完成规定功能的能力。

定义中“产品”的概念具有广义的含义,是指作为研究对象或试验对象的元件、零部件、机械设备或系统。

对工程机械而言,规定的条件是指作业条件、环境条件、维护条件、操作技术和管理水平等。离开了规定的条件,可靠性的评价就失去了基础,也就不能正确判断产品的质量。

规定的时间是指度量产品使用过程的尺度,可以是工作小时数、应力循环次数、工作转数、行驶里程等。由于各种磨损、老化、疲劳等现象的存在,产品不可能永久保持其技术状态不变,因此,规定的时间就成为确定产品可靠性的先决条件。

所谓规定的功能,是指国家标准和有关技术文件中所规定的产品的各种功能、技术性能指标和要求。通过试验证明达到规定的各项指标和要求,则称产品完成规定的功能,如果不能完成规定的功能,则称产品发生故障(Fault)或失效(Failure)。描述产品功能的数量指标是故障诊断的基本判据,如果没有明确的数量界限,就难以正确判断是否发生故障,也会引发争议。

定义中的能力是指产品完成规定功能的可能性。由于产品故障是一随机现象,因此,这种可能性具有统计学的意义,常用不发生故障的概率加以表示。

对于工程机械产品,可靠性的概念可表述为:在规定的作业工况、使用维护、封存及运输条件下,在规定的寿命周期内,产品保持技术性能指标在允许的范围内,并完成规定作业功能的能力。

产品的可靠性在设计中确定,在制造中形成和保证,在使用过程中得到检验和逐渐丧失。把产品在生产制造中所形成的可靠性称为固有可靠性(Inherent Reliability),它是产品的内在特性,与设计制造水平有关。产品在使用过程中所表现的可靠性称为使用可靠性(Use Reliability),使用可靠性受作业环境条件、保养、维修以及操作人员水平等因素的影响。

可靠性是一个综合概念,有狭义和广义可靠性之分。广义可靠性是指产品在整个寿命期限内完成规定功能的能力。除可靠性外,广义可靠性还包括维修性(Maintainability)和耐久性

(Durability)等。

2. 寿命

寿命或平均寿命(Mean Life)是指产品在规定的技术维护条件下保持其工作状态不超过临界状态的能力或性质,常用工作时数、应力循环次数、行驶里程数等物理量来表征。寿命是评价产品可靠性的基本特性之一。

临界状态指产品的技术参数达到允许极限值而不能继续使用时的状况。产品到达临界状态时,如果继续使用,工作效率就会降低,或者存在安全问题,即产品不能完成规定的功能。达到临界状态的产品需要作维修或报废处理。例如,机械传动的临界状态,一般是指由于磨损而达到极限配合间隙时的状况。

3. 故障与失效

故障或失效,是指产品丧失规定功能的现象。机械产品可靠性分为结构可靠性和机构可靠性。当与材料特性有关的结构、零件等丧失规定功能时,就说产品发生了失效;而当机构、机械系统丧失规定功能时,则称产品出现了故障。结构可靠性主要研究机械结构强度以及由于载荷影响而引起的疲劳、磨损、断裂等失效问题;机构可靠性则主要考虑机构在动作过程中由于运动学问题而引起的故障。

在可靠性研究中,故障与失效的术语经常混用,如故障分析与失效分析的概念是等同的,但习惯上一般称失效分析。当整机不能完成规定功能时,我们就说机器发生了故障,而当零件或元件丧失正常功能时,则称该零件或元件已失效。因此,可以认为故障与失效概念的差别主要在于侧重点、适用范围和习惯上的不同。

4. 储存性

储存性是指产品在规定的封存和运输条件下,在规定的时间内保持工作性能的性质。产品的储存性表示了产品抵抗由于封存和运输条件所产生的负面影响并保持其正常工作性能指标的能力或性质。

5. 可修复产品与不可修复产品

当发生故障后不能通过维修恢复原有功能,或者发生故障时作报废处理的产品称为不可修复产品(Not Repairable Item);反之,通过维修可恢复正常功能的产品称为可修复产品(Repairable Item)。例如,垫片、弹簧、橡胶元件等为不可修复产品,而像发动机、工程机械等一类产品为可修复产品。

6. 维修性

维修性是指产品在规定的时间内,按规定的程序和方法进行维修时,保持或恢复到能够完成规定功能的能力。维修性表示产品对于预防故障,发现故障原因,以及通过维修途径消除故障后果的适应性。维修性表示了可修复产品的性质。例如,动力装置的许多部件发生故障后可以通过维修或更换零件的途径加以修复,而某些机构(如主、副发动机,燃油、润滑油过滤器等)在使用过程中往往需要进行多次修复。因此,除了可靠性外,动力装置还需要用维修性进行描述。

二、可靠性基本内容

可靠性学科研究的领域十分广阔,分为三个基本方面,即可靠性基础理论、可靠性工程和可靠性管理。

可靠性作为产品的自身性质反映了与故障(失效)相关联的随机事件。因此,概率论与数

理统计是可靠性研究的理论基础。可靠性基础理论包括可靠性数学和失效学两个研究领域。

可靠性工程(Reliability Engineering)是指为达到产品预定的可靠性要求而进行的一系列设计、研制、生产、试验等系统性研究工作,是关于产品可靠性设计、预测、试验、评估、检验、控制和使用维修,以及失效分析等方面的边缘性工程学科。可靠性工程也是可靠性系统工程学的核心内容。

可靠性工程有许多分支学科,如机械可靠性工程、汽车可靠性工程等,主要包括产品可靠性设计、制造可靠性、可靠性试验、可靠性预测及使用可靠性等内容。

可靠性管理(Reliability Management)是一项在产品开发计划、设计、制造、使用等阶段,实施和保障可靠性技术的工作。可靠性管理与生产管理及其他工程领域里的工作都有密切的关系。可靠性管理还与产品质量管理、订货、工程维修等各项管理工作紧密相关。可靠性管理包括可靠性标准制定与实施,可靠性计划、组织评审、认证,可靠性信息管理及培训等方面的内容。

机械设备是机械可靠性的研究对象。机械是具有一定功能的技术装置,其工作建立在机械运动形式的基础之上。机械的基本组成为具有一定连接关系的部件总成和零件。

工程机械可靠性或称工程机械可靠性工程,是关于工程机械产品寿命周期各个阶段可靠性问题研究的应用性学科,是应用可靠性的一般原理和方法,结合工程机械领域的具体实践而形成的一整套理论与方法体系。工程机械可靠性还处在发展阶段,本书的内容主要包括可靠性数学基础、可靠性指标、可靠性设计、可靠性试验、故障分析基础、技术诊断、预测及可靠性管理等方面。

从系统的观点出发,可靠性工程与管理的主要包括以下内容:

①可靠性指标的确定与分配 即根据产品的功能和用户需求,制定相应的可靠性指标数值;依据一定的原则和方法,按照产品的结构逐级分配可靠性指标。

②可靠性预测 即在设计开发阶段,根据以往类似系统的可靠性数据初步估算新系统的可靠性,并与规定的可靠性指标相比较,通过逐次调整方案,达到所要求的可靠性指标。

③可靠性设计 根据可靠性理论与方法确定产品零部件以及整机的结构方案和有关参数的过程。设计水平是保证产品可靠性的基础。

④制造可靠性 指在生产制造过程中,为保证产品设计可靠性要求而制定一整套预防措施体系,并为设计的缺陷提供改进依据和建议。制造水平是影响可靠性的关键因素。

⑤可靠性试验 即通过规定的试验方法对产品进行试验,评价产品的可靠性水平,对试验结果进行统计分析,找出产品的薄弱环节和提出改善措施,使产品的可靠性指标达到所规定的要求。可靠性试验是研究产品可靠性的基本内容之一。

⑥可靠性鉴定 通过对产品可靠性试验报告的审查和评定,以及设计生产情况的评价,确定产品是否符合可靠性质量要求。只有通过可靠性质量鉴定的产品,才能正式投入批量生产和销售。

⑦使用可靠性 使用可靠性是指产品在使用阶段的可靠性保证的方法和技术。主要内容是研究产品在运行、转场运输、技术保养和维修,以及产品在封存期间的可靠性计算与措施等问题。

⑧可靠性管理 可靠性管理是贯穿于产品寿命周期各个阶段的综合性工作,可分为可靠性前期管理和可靠性后期管理。可靠性前期管理是指在产品设计生产阶段的可靠性管理,主要内容包括制定可靠性标准、可靠性管理制度,协调并监督设计和制造各阶段的可靠性工作,

收集、整理并保存各种可靠性数据资料、信息等。

可靠性后期管理是在产品使用阶段的可靠性管理。其主要内容包括建立科学完备的使用技术规范体系、技术维护体系和技术培训体系等。使用阶段可靠性管理的核心是机械设备技术状态的管理。管理的目的是,在使用过程中维持产品规定的可靠性水平。

可靠性研究的基本任务在于寻求产品在各种条件下的可靠性规律、分析故障发生的原因、机理及其相互关系,提出提高产品可靠性的方法和措施。

随着科学技术的不断发展,工程机械产品的技术水平不断提高,用户对产品的可靠性要求也愈来愈高。产品的可靠性水平直接影响着用户的经济效益,并成为决定产品市场竞争能力的关键因素。

第二节 可靠性与产品质量

产品质量是产品满足社会与个人需要的全部特性的总和,产品的每一特性反映了产品满足相应规定功能的程度。

工程机械产品质量评价指标体系包括技术性能指标、可靠性指标、工艺性指标、人机工程学指标、技术美学指标等(图 1-1)。

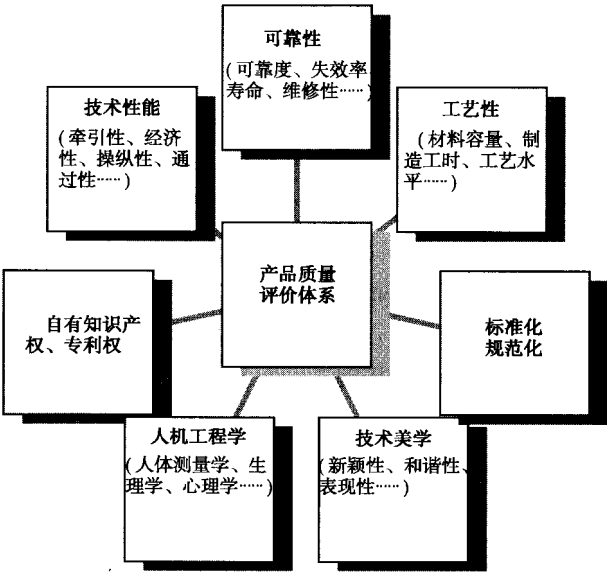


图 1-1 工程机械产品质量评价指标体系

技术性能指标是产品质量评价指标体系中的基本指标,而产品的可靠性是保持和充分实现这一指标的基本保证。可靠性水平反映了产品完成规定功能的能力,因此,如果产品的可靠性水平较低,经常发生故障,产品就无法充分实现其自身的技术经济性能。据有关市场调研表明,可靠性是用户除价格因素外最为关心的产品性能。在工程施工方面,机械设备的故障将会延误工期,提高维修成本,给企业造成重大经济损失,甚至造成人员伤亡。

产品的结构工艺性和制造工艺水平直接影响产品自身可靠性水平的高低。制造过程中零件材料的选择、热处理工艺、制造精度、装配质量等均会影响到产品的可靠性。因此,较高的工艺水平是产品可靠性的基本保证。

人机工程学和技术美学的研究表明,人机工程学和技术美学特性同样对产品的可靠性有重要影响。因为,产品的工作过程是由人与机器组成的系统相互作用而完成的,不重视这些方面的特性,将会使生产率下降、工作质量恶化、产生各种误操作和生产事故,这些都会影响到工程机械产品的使用可靠性。

产品在寿命期内能够始终保持良好的工作状态,即可靠运行,是用户购买产品时的基本要求。每个用户都想购买到质量高、价格低、工作可靠的产品。因此,产品的可靠性直接影响产品的市场竞争能力。

产品的可靠性与其经济性有密切的关系。现代科学技术的发展可以使产品的可靠性达到很高的水平,问题在于为实现所希望的可靠性指标需要花费多大的代价和时间,所花费的代价与机械所产生的经济效益间的关系是否合理。因此,以最少的时间和资金消耗保证产品必要的可靠性与寿命是可靠性研究的重要问题之一。

产品的寿命周期费用是设计制造费用与使用费用之和。当提高产品的可靠性水平时,产品的设计制造费用随之增加,同时,由于减少了故障和方便了维护工作,产品的使用费用也随之减少。因此,从理论上讲,当产品的寿命周期费用达到最小值时所对应的可靠性水平为最佳经济可靠性。最低的寿命周期费用是确定产品可靠性水平的基本准则之一。据有关资料分析,产品的固有可靠性(即设计可靠性、零部件材料可靠性和制造可靠性)对产品可靠性的影响程度约占 80%,其中设计技术的影响约占 40%,材料约占 30%,制造技术约占 10%,而使用可靠性的影响约占 20%。

总之,产品可靠性是产品最重要的质量指标之一,是产品技术性能和经济性以及企业经济效益的基本保证,并决定着产品在市场中的竞争能力。

第三节 可靠性学科发展概况

与许多现代工程学科的产生一样,可靠性作为一门学科的研究起源于第二次世界大战中军事部门的需要,特别是空军和海军装备的需要。

第二次世界大战期间,美国海、陆、空军等部门的技术装备因经常发生故障而不能有效利用,当时,美国派往前线作战的飞机有 60% 不能正常起飞,电子仪器使用时有 50% 发生故障。轰炸机上电子装置的正常工作时间平均只有 20h,海军舰艇上的电子装置在使用初期有 70% 发生故障。电子装置的高故障率引起了人们的高度重视,从而使可靠性研究首先在电子学领域得到了快速发展。

美国在 1945 年~1950 年进行了大量的关于可靠性方面的研究,德国则在改进其 V— I 和 V— II 型火箭性能时,就提出了可靠性的概念。

研究可靠性的最初机构有美国的电子灯具发展委员会、飞机无线电装置管理协会、飞机材料管理协会、飞机研究与发展管理协会等。

1952 年 8 月,美国的军事部门、工业部门和学术部门联合组成了可靠性咨询专家组,研究最初的可靠性标准,他们对电子产品的设计、制造、试验、储存和使用等方面的可靠性问题进行了全面深入地调查研究。

1954 年在纽约成立了第一个美国国家可靠性委员会,此后该委员会得到了不断发展。

除美国外,英国、前苏联(主要是俄罗斯和乌克兰)、日本、法国等一些国家,也相继从 20 世纪 50 年代末期开始了系统的可靠性研究工作。

根据有关专家的观点,可靠性研究可分为三个阶段。

第一阶段(1943年~1958年),主要描述了建立在指数分布规律上的平均寿命的概率统计特性。研究认为,产品故障的发生及其原因是随机事件,随机性是事物的内在性质,具有不可避免性。

第二阶段(1958年~1968年),可靠性研究工作的特点是,大力开展了实际可靠性的试验评价,以及可靠性信息的收集和处理工作。研究的基本成果包括:重新确定了故障原因随机性及其不可避免性的概念;对一些偶然故障找到了自身的解释;确定了产品设计、结构、工艺与故障间的关系;产品的可靠性信息更加完整,对故障本质的认识更加深入。

经过这一阶段的研究,使可靠性研究工作进入了一个新的阶段。可靠性研究从电子领域扩展到了机械领域,从军事部门扩展到了民用部门。

1968年以后是可靠性研究发展的第三个阶段。在这一阶段,可靠性数学理论得到了进一步的发展,并使其与技术学科紧密结合,形成了可靠性试验方法与数据处理方法;颁布了有关可靠性标准;建立了预防维修体系和可靠性管理机构,并使可靠性的教育更加普及。

我国自1950年以来,原机械工业部有关单位对可靠性进行了研究,出版了《可靠性与环境试验》和《国外电子产品可靠性与环境试验》两种刊物,之后又在广州设立了可靠性环境试验研究所,主要研究电子产品可靠性试验。自1978年改革开放以来,我国的可靠性研究工作得到了大力发展,许多行业相继设立了可靠性专业组织,制定了相应的可靠性标准,加强了产品可靠性考核与管理工作。

经过20多年的努力,我国工程机械领域在产品可靠性研究方面取得了较大的成绩。对批量生产的工程机械产品制定了相应的可靠性指标和可靠性试验标准,高等院校的相关专业开设了可靠性课程并招收了研究生进行专题研究,从而促进了工程机械产品质量的不断提高。

作为一门现代科学技术,可靠性理论与技术在军事、工业、农业等方面的研究和应用不断深入,在机械工程领域已渗透到产品的设计、制造、试验、使用和维护等各个环节,并产生了一些分支学科,如汽车可靠性工程、机械可靠性工程等。

根据有关资料分析,可靠性工程研究发展方向主要有以下方面:

1. 多学科综合设计

多学科综合设计就是把用户对产品的可靠性要求转化为对于设计与制造各环节的具体要求,并在实施过程中加以控制。为了确保新产品的可靠性要求,在产品研制开始,组成多学科联合的设计团体,其中包括设计开发、制造工艺、可靠性、维修性、质量管理和使用保障等方面的专业人员,开展多学科综合设计,从而全面保障新产品的可靠性与质量。

2. 重视可靠性定性分析技术

波音、麦道等国际著名企业,非常重视故障模式及影响分析(FMEA)、试验—分析—改进(TAAF)方法等定性设计及分析技术的研究及应用,注意通过工程试验等途径广泛收集各种数据,总结工程经验,发现薄弱环节,采取纠正措施等方法,以便有效提高产品的可靠性及维修性(R&M)。例如,波音民用飞机分公司对各种机载设备不要求进行可靠性鉴定试验,而是通过性能试验、可靠性增长试验等来发现故障模式,采取纠正措施,提高设备的可靠性。

3. 广泛应用计算机分析技术

在发达国家,无论是高技术的民用机、航空电子设备还是一般的民用机械的R&M设计,都不同程度地采用了CAD技术,开发了各种可靠性分析软件系统。特别是在航空电子设备的设计中,从结构设计、电路设计、应力及热分析、容差分析到可靠性预计和FMEA等过程全部

实现了 CAD 化。

4. 普遍应用可靠性增长试验和加速试验方法

可靠性增长试验在航空电子设备、汽车设备及系统的研制中得到了较普遍的应用。可靠性增长计划曲线起始点的确定,增长率的选择,试验样品及试验持续时间和模型的确定等问题,都受到足够的重视。

加速试验主要有两种方法。其一是不考虑加速因子,加大应力,不改变故障机理,通过试验来加速故障的发生,找出薄弱环节,采取纠正措施,进而提高产品的可靠性。其二是利用加速试验来确定产品的可靠性,如通过加大电压或温度应力对电子产品进行加速寿命试验,求出加速因子,再外推求出产品在正常工作条件下的可靠性。

5. 转变可靠性工程师的职责范围

在国外,可靠性工程师传统的主要职责是开展可靠性试验,评估产品的可靠性,验证产品是否达到规定的可靠性要求。现代可靠性工程师的主要职责则是制定设计准则及指南,建立可靠性数据库,提供各种分析及设计工具、方法和软件。在未来,将会进一步要求可靠性工程师成为设计组的成员,负责对设计工程师进行可靠性教育,使每个设计师都了解可靠性,从而确保产品的工作性能和寿命。

6. 注重人机可靠性的研究

随着硬件设备可靠性的不断提高,由于人为因素造成的设备故障及事故率不断上升,成为主要的影响因素。在近 10 年来的国际民航飞机事故统计中,人为因素造成的事故占一半以上。因此,对人机系统的可靠性研究受到重视。

此外,在国外非常重视可靠性教育及其学术交流。美国在许多大学的工学院中开设有可靠性工程课程,并设立可靠性硕士和博士学位。由于可靠性工程师必须具有雄厚的工程基础,故在许多大学中只设可靠性硕士及博士学位,不设学士学位。美国十分强调设计师及可靠性工程师的在职培训,经常举办各种类型的研讨班及短训班。在大学和研究机构中每年都定期和不定期地组织可靠性学术研讨会和专题讨论会,学术气氛十分浓厚。

第二章 可靠性数学基础

第一节 随机事件与概率

一、随机事件及其相互关系

1. 随机事件

自然界中,在一定条件下可能发生也可能不发生的现象称为随机现象(Random Phenomena)。随机现象是一种非确定性现象,这种非确定性现象的某种可能结果称为随机事件(Random Event)或偶然事件,简称“事件”。例如,机械设备工作到时刻 t 是否发生故障,就是一个随机现象,而发生故障则是一个随机事件。与之相对应,把一定条件下必定发生的事件称为必然事件(Certain Event),而把一定条件下必定不会发生的事件称为不可能事件(Impossible Event)。

随机事件有两个基本特点:一是在一次观测中其发生与否是不确定的;二是在相同条件下,对其进行多次重复试验观测时,观测结果具有某种统计规律性。

在随机试验(Random Trial)观测中,一般把必然事件记作 Ω 或 S ,不可能事件记作 $\emptyset$,而把随机事件用大写字母 A, B, C 等来表示。

2. 随机事件间的相互关系

①事件的包含与相等:若事件 A 发生必然导致事件 B 发生,则称事件 B 包含事件 A ,或称 A 属于 B ,记作 $A \subseteq B$ 或 $B \supseteq A$ 。

例如,对于发动机,设 A 表示随机事件“供油系统不工作”, B 表示随机事件“发动机不启动”,则有 $A \subseteq B$,因为供油系统不工作则发动机必定不会启动。

如果事件 B 包含事件 A ,同时事件 A 包含事件 B ,即若有 $A \subseteq B$,且有 $B \subseteq A$,则称事件 A 与事件 B 相等或等价,记作 $A = B$ 。

②事件的和:若事件 A 与事件 B 至少有一个发生,则这样的事件称为事件 A 与事件 B 的和事件,记作 $A \cup B$ 。

③事件的积:若事件 A 与事件 B 同时发生,则把这样的事件称为事件 A 与事件 B 的积事件,记作 $A \cap B$ 。

在串联系统中,只有当组成元件同时工作时系统才能正常工作。因此,串联系统是积事件的典型例子。

④事件的差:若事件 A 发生而事件 B 不发生,则该事件称为事件 A 与事件 B 的差事件,记作 $A - B$,或 $A \setminus B$ 。

⑤互斥事件:若事件 A 与事件 B 不能同时发生,即, $A \cap B = \emptyset$,则称事件 A 与事件 B 是互不相容的,或称 A 与 B 是互斥的。例如,同一零件的“失效”与“未失效”就是两个互斥事件,同样,一个产品的“合格”与“不合格”事件是互不相容的。

⑥互逆事件:若事件 A 与事件 B 满足条件:

$$\left. \begin{aligned} A \cup B &= \Omega \\ A \cap B &= \emptyset \end{aligned} \right\}$$

则称事件 A 与事件 B 互逆,又称 A 是 B (或 B 是 A) 的对立事件或逆事件,记作 $A = \bar{B}$ 或 $B = \bar{A}$ 。

二、概率及其运算定理

概率(Probability)是度量随机事件发生的可能性大小的数量指标,常用小数或百分数表示。

1. 概率的古典定义

若随机事件能以 n 种互不相容和等可能的方式发生,且其中 m 种结果属于事件 A ,则事件 A 发生的概率为 m/n ,记作:

$$P(A) = \frac{m}{n} \quad (2-1)$$

古典概率(Classical Probability)的条件比较严格,在实践中难于直接应用。因此规定了概率的统计定义:若试验次数为 n ,其中具有属性 A 的次数为 m , m/n 为事件 A 发生的频率,则事件 A 发生的概率为:

$$P(A) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{m}{n} \quad (2-2)$$

其中, m 又称为事件 A 发生的频数。在工程实践中,当试验次数足够多时,用频率 m/n 代替事件的概率,可以得到足够满意的结果。

2. 概率运算基本定理

(1) 互补定理

已知事件 A ,其对立事件为非 A ,记作 $\bar{A}$,显然:

$$P(A) + P(\bar{A}) = 1 \quad (2-3)$$

例如机械设备,如果其发生故障为 A 事件,则不发生故障为 $\bar{A}$ 事件,于是在某一时间内机械设备发生故障与不发生故障的概率之和必然为 1。若机械设备发生故障的概率为 2%,则不发生故障的概率必然是 98%。

(2) 加法定理

若 A 、 B 两事件互不相容,则 A 与 B 的和事件的概率为:

$$P(A \cup B) = P(A) + P(B) \quad (2-4)$$

例如,已知发动机有 A 、 B 两种可能故障,若 $P(A) = 0.02$, $P(B) = 0.03$,则发动机出现 A 故障或 B 故障事件($A \cup B$)的概率 $P(A \cup B) = 0.02 + 0.03 = 0.05$ 。

若 A 、 B 为两相容事件,则 A 与 B 的和事件的概率为:

$$P(A \cup B) = P(A) + P(B) - P(A \cap B) \quad (2-5)$$

(3) 乘法定理

若 A 、 B 为两独立事件,即 A 事件的发生不会影响 B 事件的发生,反之亦然,则 A 与 B 的积事件的概率为:

$$P(A \cap B) = P(A) \cdot P(B) \quad (2-6)$$

在上述例子中,发动机同时出现 A 、 B 故障(设 A 、 B 独立)的概率 $P(A \cap B) = 0.02 \times 0.03 = 0.0006$ 。

当 A 与 B 不独立时,则有:

$$\begin{aligned}P(A \cap B) &= P(A) \cdot P(B|A) \\&= P(B) \cdot P(A|B)\end{aligned}\quad (2-7)$$

其中, $P(B|A)$ 及 $P(A|B)$ 分别为事件 B 和事件 A 的条件概率。

例 2-1 一批产品总数为 1000 件,其中一等品为 820 件。为检查该批产品质量,从中随机抽取 3 件,问 3 件全都是一等品的概率?

解:设抽取方法为连续不放回抽样,每次抽取一件均为一等品的事件分别为 A 、 B 、 C 。因产品数量较大,每次抽取对下次抽取的概率影响不大,故将 A 、 B 、 C 看作独立事件。于是,根据乘法定理,三次抽取全是一等品的概率为:

$$\begin{aligned}P(A \cap B \cap C) &= P(A) \cdot P(B) \cdot P(C) \\&= (820/1000) \cdot (819/999) \cdot (818/998) = 0.551\end{aligned}$$

例 2-2 某装置由功能独立的两个部件组成。已知:部件 1 发生故障的概率为 $P(A) = 0.02$,部件 2 发生故障的概率为 $P(B) = 0.03$ 。试计算两个部件分别为串联和并联连接时,该装置不发生故障的概率。

解:①两部件串联:只有当两个部件都不发生故障时该装置才能正常工作,于是,“装置不发生故障”事件是 A 、 B 对立事件 $\bar{A}$ 、 $\bar{B}$ 的积事件 $\bar{A} \cap \bar{B}$,则:

$$\begin{aligned}P(\bar{A} \cap \bar{B}) &= P(\bar{A}) \cdot P(\bar{B}) = [1 - P(A)] \cdot [1 - P(B)] \\&= (1 - 0.02)(1 - 0.03) = 0.9506\end{aligned}$$

即该装置不发生故障的概率为 95.06%。

②两部件并联:两部件只要有一个不出现故障该装置就可正常工作,于是,“装置不发生故障”事件是 A 、 B 同时发生事件 $A \cap B$ 的对立事件。

设 $A \cap B = C$,则有:

$$\begin{aligned}P(\bar{C}) &= 1 - P(A \cap B) = 1 - P(A) \cdot P(B) \\&= 1 - 0.02 \times 0.03 = 0.9994\end{aligned}$$

即两部件并联时,该装置不出现故障的概率为 99.94%。

(4)全概率公式与贝叶斯定理

设 S 为随机试验的样本空间, $A_1, A_2, \dots, A_n$ 是两两互斥事件,且有 $P(A_i) > 0, i = 1, 2, \dots, n$, 则对任一事件 B , 有:

$$P(B) = \sum_{i=1}^n P(A_i) \cdot P(B|A_i) \quad (2-8)$$

且称满足上述条件的 $A_1, A_2, \dots, A_n$ 为完备事件组。

式(2-8)即为全概率公式。全概率公式主要用于计算比较复杂事件的概率,其实质是加法公式和乘法公式的综合运用。如果把 A_i 看成是导致事件 B 发生的各种可能“原因”,那么,全概率公式表明,事件 B 发生的概率正好是在这些可能“原因”影响下发生的条件概率的加权平均的总和,其中的权重分别为 $P(A_i)$ 。

全概率公式是“由原因求结果”的概率计算方法,每个原因对结果的发生有一定的“作用”,即结果发生的可能性与各种原因的“作用”大小有关。如果需要“由结果求原因”,则由全概率公式可以推得应用广泛的逆概率公式,即:

$$P(A_i|B) = \frac{P(A_i) \cdot P(B|A_i)}{\sum_{i=1}^n P(A_i) \cdot P(B|A_i)} \quad (2-9)$$