

Kekaoxing Jishu Yu Guanli

可靠性技术与管埋

杨万凯 编著



人民交通出版社

可靠性技术与管理

杨万凯 编著

人民交通出版社出版

本 社 发 行

人民交通出版社印刷厂印刷

开本: 787×1092 $\frac{1}{32}$ 印张: 11.875 插页: 1 字数: 253千

1989年1月 第1版

1989年1月 第1版 第1次印刷

印数: 0001—6000册 定价: 5.80元

内 容 简 介

本书较全面地介绍了可靠性技术、概念、基础知识及常用的几种理论分布的应用,统计推断的基本概念,可靠性试验,整机、磨损零件和疲劳零件的寿命及其可靠性评价,不完全样本及少数样本的可靠性评价,使用调查数据与试验数据的对应回归分析,故障分析,故障模式、影响及危害分析,故障树分析,系统可靠性分析,可靠性预测、分配、增长、设计、优化,可维修性以及可靠性管理。

本书可供从事汽车、拖拉机、工程机械、汽车运用维修管理、农业机械、机械类等工程技术人员使用;供厂(所)长、总工程师可靠性学习班使用;亦可供高等院校有关机械类专业师生参考。

前 言

可靠性工程是近二三十年来迅速发展起来的一门新兴学科。从50年代起，一些工程技术人员和数学家们便运用概率论和数理统计学对产品的可靠性问题进行了定量的研究。随着科学技术的进步，车辆和机械产品结构、性能日趋复杂和提高，使用部门对产品要求完好可靠，索赔和退货制度的出现，给机械工业提出许多急需研究和解决的课题，即可靠性工程越来越被人们所重视。

可靠性工程是以概率论和数理统计等数学为理论基础，以试验数据为研究资料，以电子计算机为辅助手段，立足于系统工程原则，权衡经济得失，将产品的可靠性提高到令人满意的程度，从而进行精确设计、合理制造、正确维修、科学管理的一门新兴学科。可靠性还是个重要性能。可靠性工程必将成为车辆和机械设计、制造、试验、使用维修、质量管理的全寿命周期的主要研究课题。

美国 E.J.亨利和 H.开梅茂特在1981年说：“在过去的10年内，没有其它应用科学象安全、风险和可靠性分析这样得到惊人的发展和推广，可能只有环境科学和计算机技术例外。”日本坪内和夫在1971年说：“在美国，可靠性问题涉及的范围极广，甚至连基层中小企业的产品也具有高可靠性，所以，对每个小零件均可放心使用……”。从那时起，日本产品应用可靠性技术取得巨大成功，许多产品能够畅销世界，关键在于产品可靠性高。美国的学者还预言，今后只

有那些具有高可靠性的产品及其企业，才能在日益激烈的国际贸易竞争中幸存下来。日本的学者则断言，今后产品竞争的焦点是可靠性。这些经验值得我们借鉴。

为了贯彻机械电子工业部“三上一提高”的方针，贯彻原机械部（86）机技函字1701号“关于加强机电产品可靠性工作的通知”精神，在教育要“面向世界，面向未来，面向现代化”的思想指导下，推动车辆和机械可靠性工程研究工作的迅猛发展，又根据1986年中国汽车工程学会可靠性专业委员会第二届年会精神，会议责成我编写一本适于厂（所）长、总工程师级别的教材，便把手头上的资料加以整理，编成此书，供举办各种类型可靠性短训班使用。

由于水平有限，书中不妥之处在所难免，敬希广大读者批评指正。

作 者

于吉林工业大学

目 录

第一章	可靠性工程概述	1
§1-1	可靠性的重要性.....	1
§1-2	可靠性学科发展简史.....	3
§1-3	国外机械产品可靠性研究情况.....	5
§1-4	机械产品可靠性特点及提高可靠性途径.....	7
第二章	可靠性概念	11
§2-1	可靠性指标.....	11
§2-2	机械产品故障特征及其分布规律.....	19
第三章	可靠性基础知识	23
§3-1	概率基本概念.....	23
§3-2	随机变量的数字特征.....	30
§3-3	常用的几种概率分布.....	33
第四章	统计推断的基础知识	48
§4-1	基本概念.....	48
§4-2	假设检验.....	53
§4-3	回归线的相关检验.....	58
第五章	可靠性试验	61
§5-1	可靠性试验种类.....	61
§5-2	常规、快速可靠性试验.....	66
§5-3	可靠性数据收集与分析处理.....	68
第六章	整机寿命及其可靠性评价	70
§6-1	定时截尾和定数截尾试验的参数估计.....	71

§6-2	置信区间的估计	73
§6-3	给定置信度下的试验时间及样本量的确定	81
§6-4	序贯寿命试验抽样方案	85
第七章	零件的耐磨寿命及其可靠性评价	95
§7-1	零件磨损量数据的统计分析	95
§7-2	零件耐磨寿命及可靠性评价	103
第八章	零件的疲劳寿命及其可靠性评价	109
§8-1	用威布尔概率纸估计参数及评价可靠性	110
§8-2	用威布尔数值分析法估计参数及评价 可靠性	123
第九章	少量数据分析及其可靠性评价	129
§9-1	不完全样本的数据分析	129
§9-2	节省试验时间法	133
§9-3	用少数样本进行可靠性评价	140
§9-4	不知分布形式的非参数法	145
§9-5	用贝叶斯(Bayes)法评价设计的预估寿命	147
第十章	故障分析、故障模式影响及危害性分析、 故障树分析	150
§10-1	概述	150
§10-2	故障分析	151
§10-3	故障模式、影响及危害性分析	157
§10-4	故障树分析(Fault Tree Analysis)	164
第十一章	系统可靠性分析	175
§11-1	简单系统的可靠度	176
§11-2	指数分布时的系统可靠度及其平均寿命	180
§11-3	威布尔分布时的系统可靠度及其平均 寿命	183

第十二章 可靠性预测应用例	192
§12-1 预测的必要性与目的	192
§12-2 零件疲劳寿命的可靠性预测	194
§12-3 零件强度与应力间干涉的可靠性预测	206
§12-4 台架试验与调查数据的回归分析	208
第十三章 可靠度分配	212
§13-1 概述	212
§13-2 等同分配法	215
§13-3 按相对失效率比的分配方法	216
§13-4 按相对失效率比和重要度的分配方法	219
§13-5 AGREE分配法	222
§13-6 花费最小的分配方法	224
第十四章 可靠性增长	229
§14-1 概述	229
§14-2 可靠性增长模型及参数估计	232
第十五章 可靠性设计	241
§15-1 概述	241
§15-2 可靠性设计基本原理	243
§15-3 随机变量函数的统计特征	251
§15-4 强度、应力分布及参数确定	259
§15-5 可靠性设计实例	271
第十六章 可维修性	289
§16-1 概述	289
§16-2 维修性设计准则	292
§16-3 修复时间的分布	293
§16-4 维修度函数	298
§16-5 修复率	302

§16-6	平均备件数	304
§16-7	预防维修	306
第十七章	可靠性管理	315
§17-1	概述	315
§17-2	可靠性管理内容	318
§17-3	可靠性计划 (可靠性大纲)	321
§17-4	设计阶段的可靠性管理	326
§17-5	制造阶段的可靠性管理	331
§17-6	可靠性管理的组织机构	333
§17-7	可靠性教育与培训	342
§17-8	可靠性数据交换中心	344
§17-9	可靠性标准	347
附表〔1〕	标准正态分布表	349
附表〔2〕	χ^2 分布表	354
附表〔3〕	t 分布表	356
附表〔4〕	F 分布表	359
附表〔5〕	中位秩 $\hat{F}(t_i)$ 值	361
附表〔6〕	相关系数 r 的起码值	362
参考文献		367

第一章 可靠性工程概述

§1-1 可靠性的重要性

用户对产品性能, 先进好坏, 有许多评价指标, 然而可靠性是最基本、最重要的指标之一。可靠性差, 将失去信誉, 失去市场, 失去使用价值。产品经常调修、换件, 耐久性差, 都是可靠性差的表现。

国外近10几年来, 发动机第一次大修里程增加很多, 苏联吉尔130发动机, 已从1964年的12万km提到目前25万km左右, 欧、美、日等国的柴油机都在35~40万km大修。车辆平均故障间隔里程一般为1~1.5万km。相比之下, 国产发动机、车辆故障率均高, 耐久寿命差。所以, 减少车辆故障, 提高可靠性指标是非常重要的。

车辆不正常停修对企业损失很大, 国外有的国家对计划外的停修费用规定为8.1%, 尚要求压缩。美国圣路易斯市一车队, 每天每车要完成14459t·km, 运距为826km, 运价为0.04美元/(t·km), 如每天少出一辆汽车, 则减少收入463美元, 该车队共有322辆汽车, 670辆半挂车, 如果平均停1h, 其经济损失就相当大。美国西屋公司花费1000美元的审查费, 却取得10万美元的效益。日本从美国引进可靠性技术后, 使日本的汽车、工程机械、彩电、电子产品、钢材、照像机等产品能够畅销全世界, 主要在于产品可靠性高。

在国际市场上，可靠性指标不同，其价格是不同的。1959年国外小汽车保用期为90天或4000mile，到1969年便提高到5年或5万mile。可靠性差将影响国家的声誉和安全。1969年日本出口到美国的汽车遭到退货的危机，影响很坏，也引起了与汽车生产有关的各行业的巨大震动，便组织社会力量来共同解决这一问题，现在日本汽车在国际上享有盛誉，与它下决心解决可靠性问题有极大关系。1979年美国三哩岛核电站由于机械故障和人为不可靠造成泄漏放射性物质。1979年美国北美防空司令部由于软件不可靠造成防空预警系统误报。1984年美国联合碳化物公司设在印度中央邦首府博帕尔的农药厂，由于地下毒气罐阀门失灵造成毒气泄漏，死亡达3000多人。所以，对重要的设备都应进行可靠性、安全性设计及风险评价，以控制其最低的故障率。

国外还把可靠性问题提高到节约资源和能源的高度来认识，因为可靠性设计可以得到体积小、质量轻的产品，降低了材料消耗。高可靠性产品可以一顶二，甚至一顶十使用，这是日本企业家的经营思想。

产品本身技术的提高和日趋复杂化是影响可靠性的主要因素之一，这一点不能忽视。尤其是近来装有电子燃料喷射装置、电子防抱装置及其他电子自控装置的车辆日益增多，零件数目的增多，装置的复杂化，不仅要求长期正常地发挥其功能，而且在任何情况下都能可靠地工作。这就需要利用可靠性技术才能保证产品的可靠工作。

车辆可靠性和可维修性对军用越野车辆和战备使用的车辆特别重要，因为，它也是决定战争胜败的一个重要因素。

§1-2 可靠性学科发展简史

自古以来人们就广泛采用“可靠性”来作为衡量某产品质量的指标之一，人们根据使用经验，得出某产品可靠或不可靠这样一些抽象的定性的评价。第二次世界大战期间，美国空军因为飞行发生故障而损失的飞机达 21000 架，比被击落的数字多 1.5 倍。美国运往远东的作战飞机上的电子设备有 60% 不能使用，在储存期间有 50% 的电子设备失效。朝鲜战争中，美国雷达出现故障不能工作的时间占 84%、潜艇的声纳为 48%，陆军电子设备在规定的时间内有 65~75% 出故障不能使用，空军在 5 年内的电子设备维修费用超过购置费用的 10 倍。统计资料表明，花在零件修理和维护保养上的费用是新车制造成本的 5~6 倍。所以，提高可靠性特别是提高几乎均等有限寿命的可靠性将大大地减少维修时间与费用。

美国对可靠性工程特别重视，也是系统地研究可靠性学科最早的国家。1942 年美国麻省理工学院对真空管易发生故障的主要元件作了深入的调查研究，1952 年美国成立了“电子设备可靠性顾问团” (AGREE: Advisory Group on Reliability of Electronic Equipment)。该机构对电子产品的设计、试制、生产、试验、储存、输送、使用等各方面的可靠性问题，作了全面的调查研究，经 5 年时间，于 1957 年发表了“电子设备可靠性报告”，比较完整地阐述了可靠性的理论基础和研究方法。1959 年美国召开了第一届可靠性与质量管理学术会议。10 年间，完成对可靠性的基本研究后，又遵循两条不同的道路继续研究，并取得了进展。其一是从使用角度考虑可靠性以及从经济上考虑维修性和成本效果等

的研究。其二是对零件的故障进行物理性能的研究，并形成一门新的学科——可靠性物理（或称失效物理）。从前，对故障发生的原因总是靠经验和宏观的观察来推测。可靠性物理的出现，使人们放弃了那种认为故障是不可避免的想法，而是采取了科学的态度，认真研究发生故障的原因，设法从根本上预防故障。1962年美国召开了第一届可靠性和可维修性学术会议，以后每年举行一次。同年美国还召开了第一届电子设备故障物理学术会议，以后也是每年举行一次。1969年阿波罗11号登月成功，更显示出可靠性工程的卓越成就。

日本从1951年接受可靠性思想，1956年引进可靠性技术，1958年科学技术联盟设立了可靠性研究委员会。1960年成立可靠性及质量控制专门小组，1970年日本JIS标准中规定了可靠性术语。在国铁新干线，电报电话公司的电话网、日本航空公司的运行、安全管理、飞机、电子仪器、汽车及推土机等公司的各领域内大力开展了可靠性研究。1969年日本汽车行业以退货为转机，对可靠性更加关注。

1964年苏联和东欧各国在匈牙利召开了第一届可靠性学术会议，至1977年已先后召开了四次这样的会议。

1965年国际电子技术委员会(IEC: International Electrotechnical Commission)设立了可靠性技术委员会TC-56(1977年改名为可靠性与可维修性技术委员会)。1975年又召开了国际软件可靠性学术讨论会。

我国可靠性工程的研究是从60年代末开始的，航天和电子工业部是开展比较早的部门。近几年来，在机械行业也开始了可靠性研究工作。车辆行业各领域内正在大力开展可靠性研究工作。

§1-3 国外机械产品可靠性研究情况

一、日本情况

1969年发生退货事件之前,日本车辆可靠性重点研究有:确保强度方面的安全性;延长车辆保用期限;延长维修期。

1969年退货问题便成了日本的社会问题,有关行业设立了“汽车安全对策协议会”,在丰田系统的各公司内也以可靠性委员会等组织为中心,对产品开展可靠性研究。日本可靠性技术开展情况和特点是:(1)可靠性技术与管理高度结合。从日本一年一度的可靠性和维修性会议报告内容看,可靠性水平提高相当显著,基本包括两个侧面,一是提高可靠性的关键技术,二是可靠性管理。二者高度结合是日本可靠性发展的特点。(2)采用可靠性设计新技术,加强设计检评;保证产品固有可靠性是由设计决定的,制造和试验只是实现设计目标。据日本的故障统计,约有50%是属于设计问题,因而他们对设计阶段的可靠性十分重视,采取的措施有:①事前检评;②故障信息及时向设计部门反馈;③可靠性设计思想和方法的应用;④加强设计管理,建立设计评审制度。(3)重视试验和故障分析;日本对试验工作十分重视,设计、试制和批量生产各阶段都要进行试验,为此各企业在试验上投资很大。丰田汽车的试验项目和评价标准有1500多项。小松、大阪工厂可靠性试验设备十分完善,有疲劳机十余台、整机振动试验台二台、磨损试验机多台,还有液压、齿轮传动系统、制动材料试验台,地基隔振的撞击试验台,试验数据通过96通道的遥测信号处理系统采集。为了打开国际市场,丰田公司采集世界各地工况载荷进行环境模

拟试验。日本的试验和故障分析基本是不分开的，试验后随即进行分析。(4)数据交换制和数据反馈系统。数据是可靠性工程的基础，日本基本上形成三级数据交换制度，一是与国际数据交换组织 EXAC 建立联系，二是国家级数据交换系统，三是各企业的数据收集反馈系统。当年美国卡特匹勒工程机械进入日本市场后，小松几乎倒闭，后来他们动员全公司进行市场调查，共调查国内外703台设备，对12台设备长期开机率进行剖析，特别对30台整机200个部件寿命调研后采取对策，使可靠性水平大大提高。(5)生产过程中全数检验和在线自动检测的普遍性。无论是整机，还是零件，自动加工、自动检测和全数检验几乎是共同特点。不少工厂采用计算机生产管理，如本田铃鹿制作所的车体装配线是用两台主计算机控制，在线设有20个检测点，CRT显示和微机处理信息。这样不仅是提高效率，减轻劳动强度，更重要是可避免人为误差、控制精度，保证早期可靠性。(6)外协件的可靠性保证体系。日本对外协件的可靠性解决得很好，大企业扶植小企业，小工厂要维护大公司的声誉，同类配件通常选择两家以上，促进竞争。如日本电装就是丰田汽车配套件厂，它生产50多种汽车配件，除主机厂试验外，配件厂也作整车环境模拟试验，两厂一周交换一次数据，关系十分密切。(7)提高认识，领导是关键。产品能否打入国际市场，日本成功的经验是领导对可靠性的重视程度。今后产品竞争的焦点是可靠性。由于可靠性是焦点，是信誉，他们不惜巨资投到可靠性研究和管理上。可靠性提高了，一个厂顶两个厂用，这是日本企业家的经营思想。(8)加强可靠性学术活动，进行技术培训。日本各行业的可靠性研究会很多，其中科技联盟影响最大，该组织不仅为企业进行质量和可靠性培

训，且有一系列出版公司，有的连续15年组织抄录世界上51种文献杂志，每月发行。科技联盟在1971~1984年间不仅召开可靠性和维修性年讨论会14次，且重视实践，为学术界和产业界架起桥梁，还组织三批国外考察队，调查国外在可靠性研究、设计、试验、管理方面的现状和动向。

二、美国情况

美国汽车工业以明确的观点进行可靠性是在60年代中期才大力开展起来的。美国三大汽车公司可靠性研究的特点是有组织，规模大，且工作扎实。通用汽车公司的别克公司在设计、试验、生产、服务几个步骤都安排了如下的工作程序：（1）制定可靠性目标；（2）研究设计、工艺、质量管理方法、预测产品可靠性。1966年福特汽车公司把投资几百万美元建成的可靠性研究所改作可靠性试验中心，以底盘试验为主，装备100台以上的试验设备，采用模拟道路数据，用自动控制器进行加速寿命试验、测定产品可靠性，结果三大公司中福特公司的退货件数减少最多。福特汽车公司美北部编制的汽车可靠性实用手册，在技术人员中强制普及，推广应用，成为工程师书案上必备工具书和工作指南。美国的迪尔公司也在大力推广可靠性技术。

§1-4 机械产品可靠性特点及 提高可靠性途径

一、特 点

1. 不要求太高的固有可靠度 地面行走机械不象飞机、

航天和电子设备要求很高的固有可靠度，但有些总成，如制动、转向等系统则要求有较高的安全可靠性。

2.机械产品是可维修系统 对于可维修系统，除使车辆少发生故障这种狭义的可靠性要求外，还包括出现故障或工作不正常时能迅速修复这样一种可维修性内容，也就是说，可靠度和可维修度两者结合起来，才能使设备处于满意状态，设备处于正常状态的概率就会增加，这就是广义的可靠性内容，也就是有效度。

设备则要求有较高的有效度，为此，一方面要尽量少出故障，另方面使平均维修时间尽量缩短。

3.机械产品以串联型为主 机械产品不象电子系统那样线路复杂交叉，而多半以串联或并串联组合，且以串联为主，即有一零件损坏，其余均不能工作。

二、提高途径

1.制订可靠性工作计划 机械设备是一种综合性技术，各部门间平衡和协调十分必要。即要与总成、系统的复杂化、高性能相适应，又要以有限的费用和时间来满足对可靠性的要求。从设备设计到报废的整个寿命周期，它的所有技术和数据资料，以及其经验均为下代产品提供借鉴。必须明确可靠性目标 and 需求，并在整个寿命周期内推进可靠性计划的实施。

2.提高零件的可靠性 损伤劣化机理、缺陷的检测、寿命的预测等都是设法提高产品的可靠性，并进而对物理学提出新的研究任务。因而，可靠性物理是可靠性工程发展的一个新阶段。

3.执行可靠性技术循环过程 可靠性工程是一种综合性