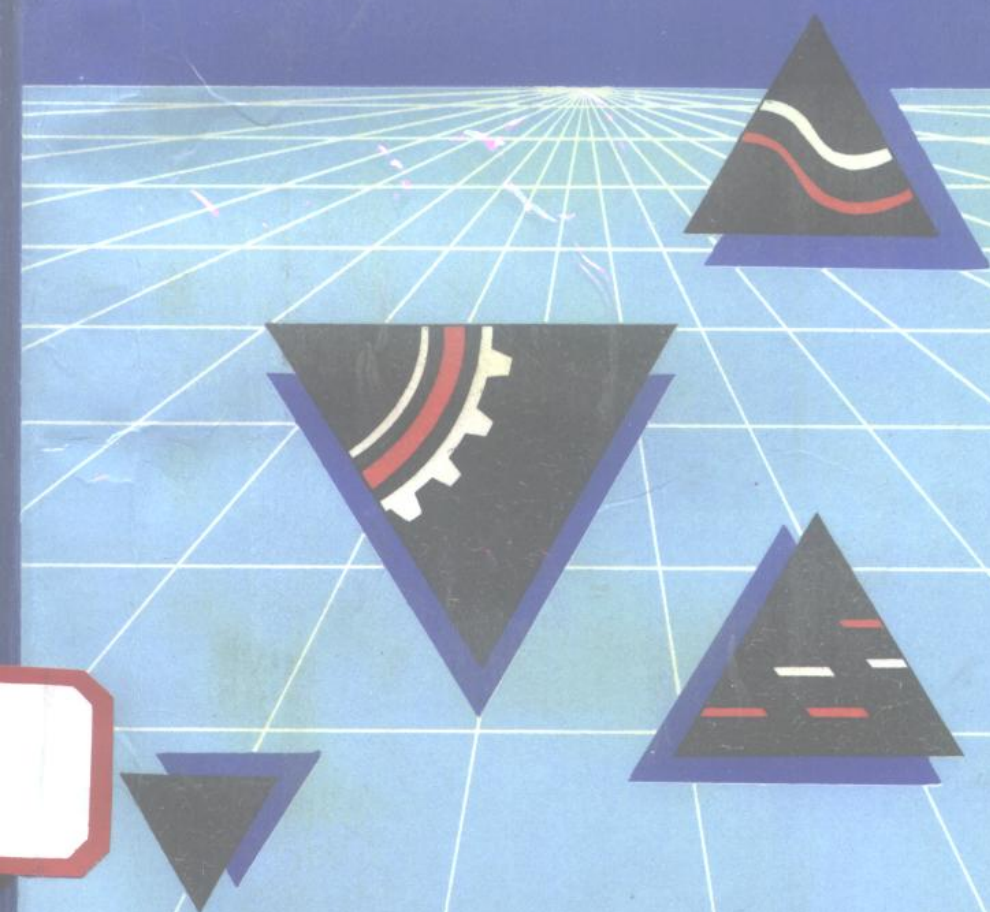


可靠性评定与分析

及其在机械工业中的应用

万涤生 编著



中国标准出版社

可靠性评定与分析

及其在机械工业中的应用

万涤生 编著

江苏工业学院图书馆
藏书章

中国标准出版社

图书在版编目(CIP)数据

可靠性评定与分析及其在机械工业中的应用/万涤生著.
北京:中国标准出版社,1994.12

ISBN 7-5066-1046-9

I. 可… II. 万… III. 可靠性理论-应用-机械工业
IV. TH161

中国版本图书馆 CIP 数据核字(94)第 11816 号

中国标准出版社出版

北京复兴门外三里河北街 16 号

邮政编码:100045

电 话:8522112

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

版权专有 不得翻印

开本 850×1168 1/32 印张 14¼ 插页 3 字数 401 千字

1995 年 12 月第一版 1995 年 12 月第一次印刷

印数 1—2 000 定价 19.00 元

*

科 目 347—047

前 言

可靠性技术的重要性日益为人们所认识,其应用范围在不断扩大,从空间技术、军事工业,供电、钢铁与化工企业,到机械工业等都在不同程度地使用。

可靠性工程在逐渐发展为一门新的学科,它也是系统工程的具体应用。

本书全面地讨论了可靠性的计划、评定技术和分析方法,还讨论了可靠性设计的问题。所述的技术与方法可适用于大多数技术专业,而应用于机械工业的内容较多。本书讨论了机械工程特别是设计方面的一些可靠性问题;最后通过建立材料失效逻辑模型探讨了系统识别材料失效机理改进机械零部件可靠性的新途径。

本书尽可能不涉及或少涉及数学,因而勿需多少概率统计学知识就可读懂本书,这也易于普及教育和职工培训。另外在注释和附录等处介绍了一些数学知识,供有兴趣的读者参考。

因水平关系,不妥之处在所难免,欢迎批评指正。

万涤生

1994年5月

目 录

第一章 绪论.....	1
1 可靠性工程	1
2 企业中的可靠性工作	4
第二章 可靠性计划	8
1 定义阶段	9
1.1 可靠性的可行性研究和可靠性目的与要求的陈述	9
1.2 可靠性标准和合同	10
2 设计与开发阶段	14
2.1 零部件、材料与工艺过程的分析	14
2.2 已确立的和新奇的特征的分析	14
2.3 失效模态、效应与危急性分析(FMECA)	14
2.4 故障树分析(或事件序列分析)	15
2.5 应力和最坏情况的分析	15
2.6 储备(余度)分析	15
2.7 可靠性评定	16
2.8 人的因素	16
2.9 设计更改的控制	17
2.10 设计审查	17
2.11 设计的内部审核	18
2.12 安全计划	18
2.13 维修计划	18
2.14 零件、组件与部件试验	18
2.15 性能试验和环境试验	18
2.16 加速试验	19
2.17 耐久性试验	19
2.18 可靠性证明试验	19

2.19 数据的收集、分析和反馈	20
3 生产阶段	21
3.1 可靠性成果的常存	21
3.2 质量性能的验证	21
3.3 元器件和组、部件的筛选(试运转,老练)	21
3.4 可靠性证明试验	22
4 使用与维修阶段	23
4.1 信息与数据的收集、分析与反馈,重新设计/改型	23
4.2 维修	23
第三章 可靠性评定	25
1 引言	25
1.1 失效力学	25
1.2 置信度	30
2 简单系统的网络模型与评定	31
2.1 网络模型的概念	31
2.2 串联系统	32
2.3 并联系统	35
2.4 串-并联系统	38
2.5 部分储备的系统	41
2.6 旁联储备的系统	44
3 复杂系统的网络模型与评定	54
3.1 模型与评定的概念	54
3.2 条件概率法	55
3.3 割集法	57
3.4 前述二技术的应用与比较	64
3.5 结集法	67
3.6 联络矩阵技术	69
3.7 事件树	72
3.8 故障树	85
3.9 多失效模态	88
4 系统可靠性的近似评定法	92
4.1 引言	92
4.2 串联系统	93

4.3	并联系统	98
4.4	网络简化技术	101
4.5	最小割集/失效模态方法	102
4.6	包括有预防(计划)维修的系统	104
4.7	共同模态的失效	107
5	非指数分布的系统	120
5.1	引言	120
5.2	阶段法	121
5.3	串联阶段	123
5.4	并联阶段	124
5.5	同二并联阶段串联的串联阶段	125
5.6	时间依赖与极限状态的概率	126
第四章 可靠性分析方法		140
1	贝氏分析贝努里试验和恒定瞬时失效率的置信界限	141
1.1	贝氏方程式	141
1.2	贝氏共轭和非贝氏方法	142
1.3	用贝塔分布的贝努里试验的贝氏估计法	144
1.4	偶然失效的分析	147
1.5	负指数以外的其他分布	149
2	汽车可靠性计划的示例	153
2.1	可靠性计划	153
2.2	评述	157
3	不同的泵系统的可靠性评定示例	157
3.1	数据	158
3.2	假设	159
3.3	蒙特卡罗仿真结果	160
3.4	马尔科夫结果	161
3.5	输出能力的期望值	162
3.6	讨论和结论	162
4	应用于汽车发动机零部件的失效模态、效应与危急分析(FMECA)	163
4.1	要在哪个层次上进行 FMECA 的确定	163
4.2	分析方法	163
4.3	应用于汽车发动机零部件的示例	166

5 飞行器电子控制系统的生产可靠性证明的示例	166
5.1 生产可靠性保证试验	166
6 帕雷托原理之应用于家用洗衣机失效数据的示例	169
6.1 担保记录的数据	169
6.2 结论	171
7 食品工业用的往复式压缩机中磨损的威布尔分析的示例	171
7.1 压缩机系统的说明	171
7.2 问题的重新定义	173
8 科学仪器可靠性数据收集和可靠性预计的示例	175
8.1 目的	175
8.2 体系的考虑	176
8.3 数据处理人员	176
8.4 质量指标	180
8.5 帕雷托分析	180
8.6 讨论	183
9 多刀机床的换刀时间分布的示例	185
9.1 仿真实验	185
9.2 威布尔参数的估计	185
9.3 β 与刀数间的关系	187
9.4 数值示例	188
10 机器失效数据的不同威布尔分析方法的示例	189
10.1 累积分布函数法	190
10.2 累积危险函数法	192
10.3 分布的平均值	194
11 锅炉控制系统的安全分析技术的示例	195
11.1 失效模态效应与危急分析(FMECA)	197
11.2 事件树分析	201
11.3 故障树分析	205
12 优质的可靠性设计	215
12.1 典型的可靠性计划的要素	215
12.2 确定可靠性的总目标	219
12.3 可靠性分配、预计和分析	220
12.4 公差的选择	229

12.5	设计审查	231
12.6	失效模态/效应和故障树的分析	233
12.7	零部件的选择和控制	235
12.8	由试验评价设计	236
12.9	设计期间改进可靠性的方法	239
12.10	纠正措施体系	242
12.11	有效性	243
12.12	维修性	245
12.13	新产品设计中的安全性	247
12.14	设计期间的安全技术	248
12.15	人的因素	252
12.16	成本与产品性能	253
第五章	机械工程中的一些可靠性问题	255
1	机械失效的模态	256
1.1	失效模态的定义	256
1.2	实践中所观测的失效模态	257
2	失效分析技术	263
2.1	失效分析的程序	264
2.2	断裂的正常位置	265
2.3	关于断裂问题的考察方法	266
3	基本单一载荷下的断裂方式	270
3.1	剪切断裂方式	271
3.2	劈开断裂方式	271
3.3	其他断裂方式	272
4	断裂力学在产品设计中的应用	277
4.1	线性弹性断裂力学	277
4.2	断裂力学在设计中的用法	290
4.3	示例	297
4.4	裂缝扩展的断裂力学方法	299
4.5	服务载荷仿真(模拟)和实物大小(1:1)疲劳试验	307
4.6	损伤容许度和断裂控制	309
4.7	示例	313
5	设计中的某些疲劳问题	316

5.1 高周期疲劳	319
5.2 低周期疲劳	328
6 系统地识别材料失效机理改进机械零部件可靠性的方法	342
6.1 方法概述	343
6.2 材料失效逻辑模型(MFLM)	343
6.3 MFLM 之应用于计算机辅助识别	361
附录 A 设计审查程序	364
附录 B 可靠性试验	365
附录 C 可靠性和维修性数据的产生、流动、分析和解释	383
附录 D 失效分类	398
附录 E 置信水平与界限	400
附录 F 仿真(模拟)技术	408
附录 G FMECA 中的危急性子因素指南	436
附录 H 服务失效数据的综述	438
附录 I 任何分布的情况	440

第一章 绪 论

1 可靠性工程

第二次世界大战期间,美军装备在运往东亚的运输和保管过程中半数以上因不能使用而作废。这种损失使美国决定投入力量研究可靠性问题。1943年由军方、学术界和生产企业组成联合小组开始进行可靠性研究工作。从50年代起,从经验的定性方法走上将可靠性、有效性与维修性等参数数量化的轨道,培养专家进行可靠性数量化工作。到1957年,美国国防部电子元器件可靠性咨询小组提出报告,大体上确定了可靠性工程的研究方向,在60年代已逐步趋于发展成为一门学科——可靠性工程学。苏联在60年代已承认可靠性工程为一独特的专业技术,可靠性与维修性的纯理论与统计方法也发源于苏联。

可靠性技术的发展始于空间工业和军事应用,初始发展之后,紧跟着就在核工业(在连续压力下要保证核反应堆安全、可靠)、供电业(期望在需求时就能供电而无局部失效或大规模停电、灭火熄灯)以及连续作业的钢铁厂和化工厂(一旦发生系统失效则蒙受大量损失和空运转)中得到迅速的应用。这些都与大系统失效将导致严重社会后果的那些系统有关。现代可靠性技术也用于范围非常广泛的领域中,例如家用器具、汽车以及它们失效时的社会-经济效应损失很小的其他产品。

由于包括元器件(零部件)、软、硬件设备和系统等现代产品所承担的工作,在质的方面高档化了,在量的方面复杂化了,因而彼此相关的任一部分的失效将导致整个系统发生失效的机会就增加了。整个系统失效可能产生严重的社会-经济后果,乃至威胁到国家安全;也由于人机系统(人类工程学)的日益发展庞大与复杂化,新技术、新材料的发展与应用,还由于现代机电设备的高精度与高性能,使负责从简单产品到

复杂系统的计划、设计、制造与运行的工程师们所承担的工作责任更大。因而有可能因人为失误而造成重大事故。因此可靠性问题得到了人们的重视,可靠性技术也就得到了迅速的发展与应用。

用户总期望买到的产品与系统是安全、可靠的。问题是系统在其未来运转寿命期间是如何安全、可靠的呢?这个问题可由定量的可靠性评定技术得到部分回答,可靠性评定并不新鲜,不过过去的可靠性一般得自于设计师与维修师们的主观与定性的经验,被人们怀疑为技术判断。其实,技术判断也还是需要的。可靠性评定除提供一套数值指标之外,还用来指明系统可能如何失效、失效的后果,并提供信息以使工程师们与经理们将其系统的质量同经济和基本建设投资关联起来。这样做时可导致系统的更好、更经济的设计及其运转与特性的先进知识。

一旦确定了需要定量的可靠性评定时,就需要确定要用的方法和所要求的指标。实质上,所有这些技术均同元器件或系统的未来特性有关。这个未来特性的时间可能是从几秒钟到几十年,前者如地对空导弹的运转阶段,后者如发电机组。在所有情况下,在性质上不能把问题定义为注定的,而是随机的,即它随时间而随机地变动。随机过程的完全评定只能用概率方法进行,不过单靠概率论也不能预计系统的可靠性或安全性。评定需要全面了解系统,及其设计、运转方式、失效方式、环境和它承受的应力。在可靠性评定方面,技术判断是至关重要的,概率论绝对不能胜过它。为了将工程师所掌握的、系统的知识转变为其可能的未来特性的预计,概率论不过是他可用的一种工具。

关于可靠性的定义,有很多不同说法,而已被广泛认可的形式是:可靠度是元器件(零部件)或装置在所遇到的运转环境条件下适当地履行其用途(功能)到预定时间的概率。

这一定义细分为4个基本部分:概率、适当性能、时间和运转环境条件。

第一部分,概率提供可靠性评定的数值输入,也是系统适宜性的第一个指标。在许多事例中,这是最有意义的指标,但还有许多计算与使用的参数,最适宜的是依系统及其要求而定。这些参数一般都称之为可靠性指标,因而可靠度一词经常被用作为说明所有这些指标的一般术

语,而不仅是与概率一词相关联。

另外指标的典型例子为:

- 在规定时期内将发生的预期的失效数;
- 平均无故障工作时间(MTBF);
- 装置(器件)的平均运转中断时间或停歇时间;
- 由于失效所预期的收入损失;
- 由于失效所预期的输出损失。

适当的可靠性指标是用概率论确定的。不存在万能的可靠性公式或技术。如存在,所用方法和所得的公式取决于问题和可作出的假设。在所有概率统计的实际应用中必须作出许多假设。系统的可靠性分析的正确性直接与用来代表此系统的模型的正确性有关。实际的失效分布是很少完全适合于此分析中所用的分析描述,必须留心保证避免由于问题的过于简化而带来显著误差。

另外三部分,适当性能、时间与运转环境条件均为技术参数,概率论无助于其评定。往往唯有负责特定系统的工程师能满意地提供有关信息。“预定时间”可能是连续的或非常零散的,“运转环境条件”可能是完全均匀的或极度可变的,如在探空火箭的推进阶段中和民用飞机的起飞、巡航与降落中。户外运转的产品与系统的运转环境是变化多端的。零部件的失效率一般是同运转条件及其所处环境的应力水平密切相关,需要非常留心保证解释运转的所有阶段,并满意地建立模型。

“适当性能”的准则是一个工程技术与经营管理的问题。系统的失效可能是一场灾难或完全不能运转或可能是由违背所要求的系统功能而引起,例如机械泵的功率输出可能下降到最低要求以下,尽管此泵可能是仍在运转中。适当性能的评定是一个技术评估与鉴定的问题。这需要具体研究每一零部件(子系统)和此系统的失效模态。不可能规定适当的可靠性水平,因为这显然地将随此系统和相关联的失效后果而变化。在许多实际情况下,重要因素也许不是实际的或绝对的可靠性水平(尽管这不能被忽视,尤其在针对-安全的系统的情况下,其最低可靠性水平是至关重要的),而是步增的可靠性费用或每投资一元钱的可靠性的相对改进情况。在这类情况下,问题是:“为得到最大的可靠性效益,

下一元钱应投在系统中何处?”这些是极难回答的问题,但应知道,如果系统中各点的前后一致的定量可靠性指标未予评定时,它们是全然不能予以回答的。

在设计过程中要把可靠性指标设计到产品中去,否则最好的制造工艺方法也无济于事。重要的是认识到产品或系统的可靠性评定必须在设计过程中并作为设计的组成部分来进行。在设计以后试图考虑或加入可靠性是不实际的,即使可能这样做,也要耗费相当可观而又不必要的费用,因而是不值得的。应在设计期间创建产品或系统的固有可靠性。这只能通过高水准的质量保证使之转变为制成的产品或系统。完善的质量保证虽不会增高可靠性到设计阶段已被设计进去的水平以上,而不良的质量保证可严重降低固有可靠性。可见可靠性与质量保证是非常密切相关的。即使制造以后,由于不良的运转,误用或滥用和质量不良的维修程序,也容易降低固有可靠性。负责产品或系统的所有工程师均应从开始一直到废弃时牢记可靠性及其成果。

最后,重要的是认识到任何可靠性研究的最重要要求是完全了解系统的技术含义、成功的准则和可能的失效模态。否则,定量分析只是给出十分不正确与误导的结果的数学练习。概率的可靠性评定方法提供系统性能的定量预计,和也许乃至更加重要的,前后一致地评定不同建议(方案)的各个的与相对可靠性水平的方式。可靠性工程既是一种尺度又是一门学科,其理论基础是统计学,它也是一种系统工程,它与质量管理或质量保证、环境工程、价值工程、安全、人-机学、运筹学以及计算机技术等都密切相关联。可靠性评定技术的概念与基本方法没有专业界限,在大多数的(如果不是所有的)工程应用中都是适用的。

2. 企业中的可靠性工作

由上述可知,可靠性工作应在企业中进行之,其基本内容如下。

表 1-1 企业可靠性的基本工作

设计	系统设计	1. 根据功能、成本与时间上的限制确定系统的可靠性要求
		2. 确定系统的环境条件
		3. 在开发前先制订系统的可靠性标准
		4. 确定设备的运输、保管、使用、包装等方面的要求
		5. 制订可能实现的可靠性标准,以便进行产品设计
		6. 研制后制订生产阶段的可靠性规则
		7. 确定系统的可维修性、互换性、安全性等基本要求
	产品设计	1. 在考虑其他各项要求的前提下,确定部件的可靠性要求
		2. 确定部件指标
		3. 确定维修性要求
		4. 确定可靠性试验并作为产品试验验收的一部分
		5. 列出具有高可靠性的部件清单
		6. 列出可靠性低的部件清单
		7. 确定部件的失效率要求值
		8. 选出达到可靠性要求的部件
		9. 确定所选部件的寿命和非耐久性部件的检查及其互换标准
		10. 确定重要部件的获得、使用与试验方法
		11. 部件的减质数
		12. 设计部件的安全系数
		13. 采用标准设计方式
		14. 尽量减少调整点
		15. 规定调整限度与安全度
		16. 设计上如何保证不出现错误的连接
		17. 把故障显示装置放在重要部位
		18. 把自动监视与自动校正装置放在重要部位
		19. 进行安全设计
		20. 热设计(冷却、断热)
		21. 确定冲击、振动及缓冲框架、减震装置的寿命
		22. 在主要设备上安装计时装置
		23. 防霉处理、涂覆
		24. 预计可靠性和更改设计
		25. 作出部件的包装、运输、捆包的规格表
		26. 分析典型部件的失效模式,明确其所引起的效应
		27. 在必要的地方进行储备设计

续表 1-1

设计	产品设计	28. 审查部件的可靠性 29. 审查电气与机械的可靠性设计 30. 在使用条件下对产品进行技术评估的试验 31. 进行部件的寿命试验和破坏性试验 32. 比较各种试验结果与指标值,必要时进行设计更改 33. 审查图纸上已确定的部件使用情况 34. 列出低可靠性的部件清单 35. 设计上做到便于调整与互换,需要互换时不应拆卸其他零部件 36. 设计上做到使用安全与方便,有利于提高工作效率 37. 对软件的可靠性也要象硬件那样进行设计、试验与审查
制造		1. 采用规定的操作方法(工艺规程) 2. 编写先进的工艺规程,选拔与培训熟练人员 3. 自动化 4. 工序检验与最后检验 5. 只使用确认为可靠的零部件(元器件) 6. 对重要部件进行再试验与筛选 7. 必要时调整部件并于调整后使用
采购		1. 了解协作厂家的生产技术水平 2. 审查订货产品的生产设备,提供试验数据 3. 向生产厂家提供产品使用情况和各种试验要求与方法 4. 给生产厂家做可靠性试验,提供可靠性数据 5. 在订购说明书中编入可靠性要求 6. 只采购认证了的零部件,并进行验收试验 7. 进行定期试验 8. 校正不适用的零部件 9. 确定厂家等级 10. 从可靠性角度审查订购合同
使用		1. 制订正确的操作程序 2. 制订正确的维修程度 3. 确定与实施正确的包装、运输、使用与保管方法 4. 准备适当而必要的试验与校正用的附属设备、器具 5. 准备适当的检验、维修与保管设备、器具 6. 使用可靠性高的可互换的零部件 7. 对操作规程进行人-机学的评价与审查 8. 确定实际的环境条件

由此也可看出,大量工作是在设计阶段进行,可靠性问题也就以必须在设计阶段加以解决为宜。