

机械可靠性

——理论 · 方法 · 应用

牟致忠 编著

JIXIE KEKAOXING
LILUN FANGFA YINGYONG



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

机械可靠性

——理论·方法·应用

牟致忠 编著



机械工业出版社

序

值此“十一五”规划取得丰硕的成果，“十二五”规划开始启动之际，喜阅上海大学牟致忠教授的《机械可靠性——理论·方法·应用》书稿，并嘱写序。

回顾我国可靠性工程的历史，可靠性成功地实践于“两弹一星”“嫦娥工程”。“十二五”规划中，党中央、国务院把“加强质量与质量管理”列为“十二五”规划各项任务全过程的重点，并要求加速人才培养的工作。综合国内外的经验与教训充分说明，今后产品、系统及网络竞争的焦点是可靠性。

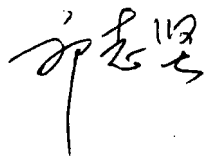
机械工业可靠性工作在我国始于 20 世纪 80 年代，1986 年原机械部发出《加强机电产品可靠性工作的通知》，先后由原副部长唐仲文、陆燕荪和李守仁担任可靠性工作的领导者，并由机械科学研究院、中国机械质量管理协会来具体组织实施和推动。

“通知”中指出，应将“可靠性工程基础”列入高等理工院校机械专业的必修课程。

牟致忠教授在担任中国机械工程学会可靠性工程专业学会副主任委员期间，为机械电子工业可靠性推广培训班编写了教材，并多次亲临授课。为国家教委主编了大学教材《机械可靠性设计》。参与了机械电子工业重大核工业项目的可靠性评估工作。在国外进修、兼职教学多年，参与了国外企业可靠性工作实践。

本书具有理论性与实践性相结合的特点。理论性是指总结了国内外各种行之有效的理论成果，系统性比较强。实践性是指作者总结了他参与的国内外可靠性教学、工程评估及具体的可靠性工程的经验、教训。因此，本书对于机械工业的可靠性工作，无论从人才培养方面还是从教学方面，都有很高的实用价值，特别对从事机械可靠性工作的技术人员具有指导意义，对于非机械行业的可靠性工作者也有一定的参考作用。

原机械电子工业部副总工程师
中国机械工程学会第一届可靠性工程专业学会主任委员



2010 年 11 月于北京

前 言

自从 Robert Lusser 1952 年在美国 San Diego 提出了可靠性的科学定义以来，已经过去了半个多世纪。在此期间，可靠性工程已成为一个普遍适用的学科和专业，不仅在航空、航天、电子、兵器和核电站工业中得到了巨大发展，而且从 20 世纪 60 年代起逐步地应用到机械、电气、通信、冶金、土木、石油、化工、水利、船舶、铁路、交通运输、医疗器械、食品加工、日用设备等各个民用工业部门。其应用之广泛，发展之迅速，影响之深远，非一般应用科学可以比拟。1969 年 7 月，Apollo-11 号飞船登月成功之后，可靠性工程被列为三大科技成就之一。当时的美国国防部长施莱辛格 (J.R. Schlesinger) 指出：“归根结蒂，可靠性是工程最实际的形式。”1984 年，在 IEEE 成立百年纪念的可靠性汇刊 (Transactions on Reliability) 专辑上，电子可靠性著名学者 A. Coppola 甚至认为“可靠性已经更强烈地反映出历史的趋势”。

简而言之，可靠性工程研究的内容包括机械和结构的、电子和电气的、零 (元) 件和系统的、硬件和软件的可靠性设计、试验和验证。可靠性试验数据是可靠性设计的基础，但试验本身不能提高产品的可靠性，只有设计才能决定产品的固有可靠性。国内外的实践经验表明，产品的可靠性是由设计决定的，而由制造和管理来保证。在产品的整个寿命期内，从设计、研制、制造、装配、试验、使用、维修直到报废，都必须进行可靠性管理。只有这样，才能保证产品能满足用户的可靠性要求。而在可靠性管理中，首要的是“最高领导懂得并支持一项设计得很好的可靠性计划。”

可靠性是产品的主要属性之一，尤其是对于军事工业。早在 1953 年，著名的智囊公司兰德 (Rand Corp) 在一项报告中指出，评价一个武器系统优劣的七项属性依次为：性能、可靠性、精度、易损性、可操纵性、维修性及可获得性。20 世纪 70 年代以来，美国军方从只追求武器系统的性能转变为强调武器系统的可靠性与维修性。时至今日，重温这段历史，对于国防建设仍具有重要的意义。

广义的质量概念包含了可靠性。广义的可靠性包含了维修性和可用性。可靠性是考虑到时间因素的产品质量，对于提高产品 (零件、部件、子系统、系统) 的可用性、降低寿命期总费用、防止产品责任和对于重要设施进行风险管理具有重大的经济意义和社会影响。自 20 世纪 70 年代以来，日本是在民用工业中推广和应用可靠性工程技术最成功的国家。日本的机电产品得以畅销全球，尤其是汽车工业能迫使美国三大汽车公司中的两家一度被迫宣布破产重组，主要因为其产品可靠性高。日本人因此断言，“今后产品竞争的焦点是可靠性”。这些历史的经验，值得我们借鉴。1993 年，当代公认的质量权威朱兰 (J.M. Juran) 曾撰文指出：“20 世纪是产量的世纪，而 21 世纪将是质量的世纪。”2009 年 5 月，当代 TQM 的代表人物，曾任美国质量协会 (ASQ) 主席和中国政府质量顾问的哈灵顿 (J. Harrington) 撰文指出：“我们不把可靠性看作质量的一部分，但是可靠性可能是质量中最重要的部分。”

环顾海内外，质量和可靠性问题几乎每天都有新闻。2010 年，英国石油公司 (BP) 在墨西哥湾的海洋平台爆炸和防喷阀门失灵引起的严重石油污染，丰田汽车因制动和暴冲问题而导致召回 800 万辆汽车，英法海底隧道交通中断事故，上海一家船厂因龙门起重机立柱倒塌

而造成重大的人身事故等，这些事故无一不与可靠性有关。可以说，质量与可靠性与民生息息相关，具有不可忽视的社会影响。

进入 21 世纪以来，我国国力日强，已成为世界第二大经济体，但不可忽视的是，在产品方面还存在许多问题。例如，我国至今还没有在国际上有竞争力的汽车品牌；大型客机的发动机需要进口……

如今，由于经济和科学技术的飞速发展，国内在可靠性工程技术方面有了很大的发展，新人辈出，他们已经在实践中做出了令国人自豪的贡献。

作者写本书的初衷有两条，第一是希望能够唤起工业集团和政府有关部门领导人对产品可靠性的重视，因为如果没有他们的战略决策和直接干预，便不会有高质量的产品，更不会有著名品牌；第二是希望有机会将多年来在国内外所学及实践经验介绍给那些有志于可靠性的年轻人。愿他们明白，在学术和事业上，需要有献身精神。

限于水平和时间，书中必有不当之处，敬请读者不吝指正。

回顾 30 多年来的历程，在此深切怀念重视可靠性工程学科发展的钱伟长校长，深切怀念在机械和航空工业领域已故的可靠性事业的领导人姚福生、杨为民和仍然健在的航天可靠性的先驱何国伟，深深感念心中爱戴的师长徐灏、郭可谦和陈先霖，深深感谢 30 多年来许多关心、支持和帮助过本人的领导、同行和朋友们。

由衷感谢：原机械工业部郭志坚副总师在百忙中为本书写了序，日立全球资讯储存技术可靠性工程技术总监、原 IEEE 可靠性汇刊副主编孙凤斌博士为本书提供了宝贵信息和建议；阚树林教授帮助整理书稿并提出宝贵意见；王宝华教授帮助整理并打印第 12 章书稿；研究生陈其红、秦臻、戚珩、樊迅、程雅打印了全部书稿。作者也由衷感谢机械工业出版社的编辑对本书的大力支持。没有他们的帮助，出版本书是不可能的。

最后，深深感谢妻子和儿女对作者在过去一年内专心写作的理解和支持。

牟致忠

2010 年 12 月于上海

符号表

A ——可用性；可用度	s^2 ——样本的方差
$A(t)$ ——可用度	s_a ——应力幅
CDF ， cdf ——累积分布函数	s_m ——平均应力
CL ——置信度	V ——变异系数
$E(x)$ ——随机变量 x 的数学期望（均值）	V_s ——强度的变异系数
$F(t)$ ——随机变量 t 的累积分布函数；不可靠度	V_s ——应力的变异系数
$F(x)$ ——随机变量 x 的累积分布函数	$V(x)$ ——随机变量 x 的方差
$f(x)$ ——随机变量 x 的概率密度函数	$\hat{x}$ —— x 的估计值
$g(t)$ ——修复时间的概率密度函数	$\bar{x}$ ——样本的均值
L ——寿命，载荷	$\tilde{x}$ ——样本的中位值
L_q ——失效百分数为 q 时的寿命	z ——联结系数；标准正态分布随机变量的值
M ——维修性；维修度	β ——威布尔分布的形状参数，威布尔斜率
$M(t)$ ——维修度	γ ——威布尔分布的位置参数；风险
$MTBF$ ——平均故障间隔时间	ε ——误差
$MTTF$ ——平均失效时间（失效前平均工作时间）	ζ ——强度与应力的差
$MTTR$ ——平均修复时间	η ——威布尔分布的尺度系数，特征寿命
N ——失效循环次数	λ ——失效率
n ——安全系数；样本量；工作循环次数	$\lambda(t)$ ——瞬时失效率
$N(\mu, \sigma)$ ——均值为 μ 、标准差为 σ 的正态分布	μ ——母体的均值
$N(\mu, \sigma^2)$ ——均值为 μ 、方差为 σ^2 的正态分布	$\bar{\mu}$ ——均值的估计值
$N(0,1)$ ——标准正态分布	$\mu(t)$ ——修复率
P ——概率	ν ——泊松比；自由度
$P(A)$ ——事件 A 发生的概率	ρ ——相关系数
$P(A/B)$ ——在事件 B 已经发生的条件下事件 A 发生的概率	σ ——母体的标准差
PDF ， pdf ——概率密度函数	$\tilde{\sigma}$ ——标准差的估计值
P_f ——失效概率	σ_b ——强度极限
R ——可靠性；可靠度	σ_s ——屈服极限
$R(t)$ ——可靠度	σ_{-1} ——持久极限
r ——应力比	σ_{s_a} ——应力幅的标准差
R_{L_1} ——可靠度的单侧置信区间下限	σ_{s_f} ——应力的标准差
R_{L_2} ——可靠度的双侧置信区间下限	σ_{s_m} ——平均应力的标准差
R_{U_2} ——可靠度的双侧置信区间上限	τ ——剪应力
S ——强度	τ_{-1} ——剪切持久极限
s ——应力；样本的标准差	$\Phi(z)$ ——标准正态分布函数

目 录

序

前言

符号表

第 1 章 绪论.....1

1.1 概述.....1

1.1.1 研究可靠性的重要性.....1

1.1.2 可靠性的范畴和机械可靠性的 发展.....2

1.1.3 可靠性与质量管理的关系和区别.....6

1.2 可靠性管理.....8

1.2.1 可靠性管理的内容.....8

1.2.2 可靠性大纲.....12

1.2.3 可靠性工程部门的职责.....14

1.2.4 注册可靠性工程师(CRE, Certified Reliability Engineer).....15

1.3 可靠性的定义和特征量(指标).....15

1.3.1 可靠性的定义和要点.....15

1.3.2 机械可靠性的特征量(指标).....16

1.4 影响机械设备和电子、电气设备可靠性 的因素.....22

第 2 章 可靠性的数学基础.....23

2.1 概率.....23

2.1.1 概率的基本概念.....23

2.1.2 古典概率与统计概率.....24

2.1.3 概率的基本定理与运算.....25

2.1.4 贝叶斯定理及其应用.....27

2.2 随机变量.....28

2.2.1 离散型随机变量.....28

2.2.2 连续型随机变量.....29

2.2.3 累积分布函数(CDF).....30

2.2.4 概率密度函数(PDF).....31

2.2.5 随机变量的数字特征.....32

2.2.6 多维随机变量.....33

2.3 可靠性工程常用的概率分布.....34

2.3.1 伯努利试验和二项分布.....34

2.3.2 泊松分布.....35

2.3.3 正态分布.....36

2.3.4 对数正态分布.....41

2.3.5 威布尔分布.....42

2.3.6 指数分布.....50

2.3.7 几种常用的概率分布的应用范围 及实例.....51

2.4 数理统计.....52

2.4.1 数理统计的基本概念.....52

2.4.2 分布参数估计.....53

2.4.3 假设检验.....58

2.4.4 回归分析.....61

第 3 章 机械可靠性设计的内容和方法.....63

3.1 机械可靠性设计的内容.....63

3.2 机械可靠性设计的特点.....65

3.3 机械可靠性设计的方法.....66

3.3.1 失效模式、影响及危害度分析 (FMECA).....66

3.3.2 概率设计.....66

3.3.3 普通失效率法.....70

3.3.4 几种机械可靠性设计方法的比较.....71

第 4 章 普通失效率法在机械可靠性计 算中的应用.....72

4.1 基本概念.....72

4.2 常用的普通失效率数据来源.....73

4.3 使用普通失效率计算机械系统的 可靠性.....78

4.4 一些机械零部件的失效率模型.....79

4.4.1 阀门的失效率模型.....79

4.4.2 密封的失效率模型.....80

4.4.3 滚动轴承的失效率模型.....81

第 5 章 确定应力分布和强度分布的 方法.....82

5.1 概述	82	设计到零件中去	134
5.1.1 确定应力分布的过程及步骤	82	第7章 机械零件可靠性设计数据的获得方法	136
5.1.2 确定强度分布的过程及步骤	83	7.1 概述	136
5.2 影响应力分布和强度分布的物理与几何参数的统计数据	84	7.1.1 由试验得到的 $S-N$ 分布线图	136
5.3 P_f-S-N 曲线	86	7.1.2 按经验方法做出的 $S-N$ 分布线图	137
5.4 复合疲劳应力下的强度分布	87	7.2 静强度分布数据	138
5.5 用代数法综合应力分布和强度分布	88	7.3 失效循环次数 N 的分布数据	140
5.6 用矩法综合应力分布和强度分布	92	7.4 有限寿命下的强度分布数据	143
5.7 用 Monte Carlo 模拟法综合应力分布和强度分布	94	7.4.1 由试验数据确定有限寿命下的强度分布	143
第6章 应力-强度分布干涉理论和机械零件的可靠度计算	96	7.4.2 根据试验数据估计有限寿命下的强度分布	146
6.1 概述	96	7.5 长期寿命下的强度分布——持久极限分布	147
6.2 应力-强度分布干涉理论与可靠度的一般表达式	96	7.6 呈分布状态的古德曼 (Goodman) 线图的确定	149
6.3 可靠度的计算方法	99	7.7 用经验方法得到的强度分布数据	153
6.4 机械零件的可靠度计算	104	第8章 失效模式、影响与危害度分析 (FMECA)	154
6.4.1 应力分布和强度分布都为正态分布时的可靠度计算	104	8.1 概述	154
6.4.2 应力分布和强度分布都为对数正态分布的可靠度计算	106	8.2 FMECA 的内容和实施步骤	155
6.4.3 应力为威布尔分布、强度为正态分布时的可靠度计算	109	8.3 FMECA 的应用实例	159
6.4.4 已知应力幅、相应的失效循环次数分布和规定的寿命要求时, 疲劳应力下的可靠度计算	111	第9章 故障树分析 (FTA)	165
6.4.5 已知强度分布和最大应力幅, 在规定寿命下的可靠度计算	112	9.1 概述	165
6.4.6 复合疲劳应力下的可靠度计算	113	9.2 故障树分析的常用符号	166
6.4.7 顺序加载下的累积疲劳可靠度计算	113	9.3 故障树的建立	167
6.4.8 可靠度与安全系数的关系	119	9.4 故障树的定性分析	170
6.5 可靠度的置信度和置信区间	121	9.4.1 最小割集与最小路集	170
6.5.1 概述	121	9.4.2 求最小割集的方法	170
6.5.2 可靠度的单侧置信区间下限 R_{L1}	123	9.4.3 求最小路集的方法	172
6.5.3 置信度对 R_{L1} 影响	133	9.4.4 结构重要度	172
6.5.4 样本量对 R_{L1} 的影响	133	9.5 故障树的定量分析	173
6.5.5 在规定的置信度下, 把目标可靠度		9.5.1 直接概率法	173
		9.5.2 概率重要度	175
		第10章 系统的可靠性	177
		10.1 系统可靠性的分析方法	177
		10.2 串联系统的可靠性	177
		10.3 冗余系统的可靠性	178

10.3.1 并联系统的可靠性	178	11.4.5 威布尔分布应力-寿命模型	210
10.3.2 混联系统的可靠性	179	11.4.6 采用对数坐标的应力-寿命模型	214
10.3.3 表决系统的可靠性	181	11.4.7 非参数区间估计法	215
10.3.4 旁联系统的可靠性	181	11.4.8 高加速寿命试验 (HALT) 和高加 速应力筛选 (HASS) 简介	218
10.4 复杂系统的可靠性	182	第 12 章 维修性设计	221
10.4.1 布尔真值表法 (部件状态列表穷 举法)	182	12.1 概述	221
10.4.2 卡诺图法 (概率图法)	183	12.1.1 研究维修性的必要性	221
10.4.3 贝叶斯分析法	184	12.1.2 维修性的历史与发展	222
10.4.4 最小割集近似法	186	12.1.3 维修性的定义和指标	225
10.5 系统的可靠性分配	187	12.1.4 维修的分类	228
10.5.1 相对失效率比法 (比例分配法)	187	12.2 维修性设计准则	231
10.5.2 评分分配法 (加权分配法)	188	12.2.1 可靠性设计准则	231
10.5.3 AGREE 法	189	12.2.2 修复时间分布	232
第 11 章 可靠性试验	191	12.2.3 维修度函数	236
11.1 概述	191	12.2.4 修复率	240
11.1.1 可靠性试验的分类	191	12.2.5 平均修复时间	242
11.1.2 可靠性试验计划和注意事项	192	12.3 维修策略	246
11.2 指数分布寿命试验	193	12.3.1 按时 (按龄期) 更换的预防维修 方针	246
11.2.1 寿命服从指数分布时平均寿命的 确定	193	12.3.2 按固定时间间隔更换的预防维修 方针	255
11.2.2 平均寿命的置信区间	194	12.3.3 视情维修与以可靠性为中心的 维修	258
11.2.3 可靠度及其置信区间	198	12.4 可修复系统的可用度	258
11.2.4 定时截尾试验中无失效发生时平 均寿命、可靠度及其单侧置信下 限 R_{L1} 的确定	199	12.4.1 可用度定义	258
11.2.5 定数截尾试验中发生一次失效时 平均寿命、可靠度及其单侧置信 下限 R_{L1} 的确定	200	12.4.2 可修复的单个部件的可用度	261
11.2.6 不同试验类型和置信度下的试验 时间和样本量	200	12.4.3 稳态可用度	264
11.3 威布尔分布寿命试验	202	12.4.4 提高可用性的措施	267
11.3.1 完全子样的威布尔分布寿命试验	203	第 13 章 机械可靠性的几个专题与机 械零件可靠性设计应用举例	269
11.3.2 不完全子样的寿命试验	203	13.1 疲劳与断裂的可靠性设计与分析	269
11.4 加速寿命试验	206	13.1.1 疲劳可靠性设计	269
11.4.1 概述	206	13.1.2 断裂可靠性设计	271
11.4.2 逆幂律法	207	13.2 磨损的可靠性设计与分析	273
11.4.3 过载应力试验法	207	13.3 振动的可靠性设计与分析	280
11.4.4 百分寿命加速试验法	208	13.4 腐蚀的可靠性设计与分析	284
		13.5 机械零件可靠性设计应用举例	291
		13.5.1 机械零件可靠性设计应考虑的	

问题	291
13.5.2 螺栓联接的可靠性设计	294
13.5.3 过盈连接的可靠性设计	303
13.5.4 焊接的可靠性设计	305
13.5.5 弹簧的可靠性设计	305
13.5.6 轴的可靠性设计	315
13.5.7 滚动轴承的可靠性设计	322
13.5.8 联轴器的可靠性设计	325
13.5.9 摩擦离合器的可靠性设计	329

13.5.10 其他零件的可靠性设计	331
附录	338
附录 A 标准正态分布函数数值表	338
附录 B Γ 函数表	339
附录 C t 分布位数表	340
附录 D χ^2 分布位数表	341
附录 E Kolmogorov—Smirnov 分布数值表	342
参考文献	343

第 1 章 绪 论

1.1 概述

1.1.1 研究可靠性的重要性

1. 产品的失效可能造成灾难性的后果

随着现代科学技术的发展，产品（包括机电一体化高科技产品）的结构日益复杂，如图 1-1 所示，性能参数越来越高，工作环境更加严酷，往往由于一个关键零件的失效，会造成灾难性的后果。最令人难忘的事件是 1986 年 1 月 28 日美国航天飞机“挑战者”号在发射 70s 后，因助推火箭燃料箱的密封装置在低温下失效（腐蚀疲劳），使燃料溢出而引起爆炸。

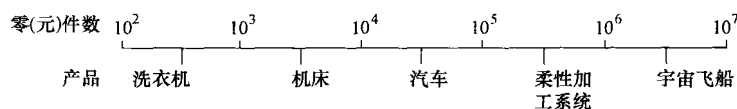


图 1-1 产品结构的复杂化

类似触目惊心的事故还有许多。例如，1984 年 12 月，美国联合碳化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效，毒气溢出，造成 3000 人死亡的严重事故；1984 年，一架波音 747 客机由于尾翼隔板疲劳断裂而在日本坠毁，造成 521 人死亡；2010 年 5 月，英国石油公司（BP）在墨西哥湾的海洋平台在钻井时发生油管爆炸而沉没，由于油井的防喷阀门失效，造成有史以来最大的海面污染，BP 将面临高达数百亿美元的经济索赔和善后处理等。

2. 产品的可靠性涉及巨大的经济效益

从个例来看，一台 30 万 kW 汽轮发电机组因叶片失效而被迫停机 1 天，则直接损失超过 100 万元，间接损失超过 2000 万元。一条货车生产线因焊接机器人发生故障而又没有备件，则停工 1h 造成的产值损失超过 100 万美元。

早在 20 世纪 60 年代，美国有人预言，今后在激烈的国际市场竞争中，只有可靠性高的产品及其企业才能生存下来。到了 20 世纪 80 年代，日本有人断言：“今后产品竞争的焦点是可靠性”。最有说服力的例子是，日本汽车由于可靠性高，已经在美国市场取得了竞争优势。值得深思的是，1969 年，日本在战后首次销往美国的汽车被全部退货。经重新设计和改进后，日本汽车于 20 世纪 70 年代中后期在美国市场站住了脚。而到了 21 世纪初，日本汽车已在美国市场取得优势地位，丰田超过通用，成为全球第一，丰田一年的利润远远超过美国三大汽车公司利润的总和。美国三大汽车公司的市场占有率从 1979 年的 80%（当年丰田的市场占有率仅为 7.1%）降至目前的不到 50%。究其原因，主要是美国汽车的可靠性不如日本。

目前国际上盛行的产品责任法、保用期、索赔制、召回等都与产品的可靠性有关。国际市场上机械产品的价格与市场占有率都与其可靠性水平的高低直接相关。重要产品在投标、签订合同、鉴定和验收时都有可靠性条款和指标,可靠性已经成为商品广告和新闻中的一个亮点。

3. 可靠性影响到国家的安全和声誉

例如,1979年3月28日美国三哩岛核电站发生的放射性物质泄漏事故是由于硬件(冷凝器循环泵)的故障和操作人员的不可靠(出水阀门在检修后忘记复位到开启状态,操作盘上也有灯显示,但操作人员没有注意到)所造成的。又如,1986年4月,苏联切尔诺贝里核电站爆炸事故,都对国家的安全和声誉造成了严重的损害。所以,对于重要的大型成套设备,如电站、冶金、化工设备等都应进行可靠性、安全性的设计和风险分析与评估,对于环境保护和居民安全进行评估,以控制其失效概率为最低。

4. 可靠性是国防和军工的需要

国际上,几乎所有的军事订货合同中都有可靠性和维修性条款。20世纪70年代后期,美国的国防技术政策有了引人注目的变化,从过去主要追求武器系统的高性能转而更加重视武器系统的可靠性与维修性。道理很明显,如果可靠性不高,性能便无从发挥。如果维修性不高,便难以保持可靠性,从而降低了可用性,并大大增加了寿命期费用。

此外,发达国家还把可靠性问题提高到节约资源和能源的高度来认识。

1.1.2 可靠性的范畴和机械可靠性的发展

1. 可靠性的范畴

自从可靠性的科学概念和理论、方法得到确认以来,它在下面几个领域中得到了发展。

(1) 可靠性数学 可靠性数学主要是研究解决各种可靠性问题的数学模型和数学方法,它属于应用数学的范畴,涉及的面比较广,主要内容包括概率论和数理统计、随机过程、运筹学等。

可靠性数学的代表人物及其著作有:①R.E.Barlow、F.Prochan和L.C.Hunter的《Mathematical Theory of Reliability》(1965);②G.J.Hahn和S.S.Shapiro的《Statistical Models in Engineering》(1967);③M.L.Shooman的《Probabilistic Reliability-An Engineering Approach》(1968);④R.E.Barlow和E.M.Scheuer的《Introduction of Reliability Theory》(1969);⑤N.R.Mann、R.E.Schafer和N.D.Singpurwalla的《可靠性与寿命数据的统计分析方法》(1974)等。研究较多的领域有:相干结构理论、更新理论、可用性理论、极值分布理论、最佳维修方针、贝叶斯理论、冗余的最优化、多变量寿命分布、蒙特卡洛模拟、随机过程和故障树分析等。

(2) 可靠性物理 可靠性物理是研究失效现象及其机理和检测方法的学科。美国Rome航空发展中心(RADC)于20世纪60年代初首先进行失效物理的研究,发展失效分析方法及技术,研究各种元器件的失效机理及失效模式,建立各种器件及材料失效的数学及物理模型,发展了各种元器件的加速寿命试验及筛选试验的方法。1961年,美国召开了第一届失效物理年会。1967年,年会改名为可靠性物理年会。

(3) 可靠性工程 可靠性工程是对产品(零件、元器件、设备或系统)的失效现象及发生概率进行分析、预测、试验、评定和控制的边缘工程学科。它的发展与概率论与数理统计、运筹学、系统工程、环境工程、价值工程、人机工程、人素工程、质量管理、计算机技术、

失效物理学、机械学、电子学等学科有着密切的联系。例如,可靠性工程追求的是系统的经济效益和运行中的安全可靠,因此它不能就事论事地研究问题,不能头痛医头,脚痛医脚,而必须系统地、综合地、从长远的眼光来研究问题。不仅考虑到硬件,还要考虑到软件,考虑人的因素、人在系统中的地位和作用、环境条件对系统的影响等。可靠性工程不仅重视技术,也重视管理。它和价值工程都是技术与经济相结合,以取得最大的经济效益为目的。它们之间的关系应当是,在达到可靠性目标的同时,用价值工程的方法来降低成本。

可靠性工程研究的对象包括电子和电气的、机械和结构的、零件和系统的、硬件和软件的可靠性设计、试验和验证。广义的可靠性还包括维修性和可用性。

2. 机械可靠性的发展

(1) 国外情况 最早有关可靠性指标的要求见于1939年英国的《飞机适航性注释》,它要求飞机的事故率小于 10^{-5} 。稍后,在20世纪40年代初,德国在研制V-1火箭时,提出了串联系统的可靠度等于单元可靠度的连乘积。在可靠性工程的理论、方法和应用上,美国一直处于领先地位,包括机械可靠性领域。

1947年,美国A. M. Freudenthal在土木工程师学会(ASCE)刊物上发表的“结构的安全性”中首次提出了“应力/强度分布干涉”理论。1954年,他在《应用物理》上发表了“疲劳中的失效和存活”,1957年,出版了《飞机结构的疲劳》。可见,他从事的领域是结构可靠性,研究方向是疲劳。

在机械可靠性领域内首先研究“应力-强度分布干涉理论”和发表论文的是D. Kececioglu (1964)。1965年,在可靠性与维修性年会的88篇论文中,有关机械可靠性的论文只有2篇。1967年,机械可靠性领域的另一个代表人物C. Lipson,他也向Rome航空发展中心(RADC)提交了研究报告:“可靠性预测-机械应力/强度干涉”。C. Lipson的代表作是1973年出版的《Statistical Design and Analysis of Engineering Experiments》。其中给出了许多机械零件,尤其是汽车零件可靠性的实例。1980年,可靠性著述最多的B. S. Dhillon对应力-强度分布干涉理论作了进一步的阐述,将其应用扩展到冗余系统。

对机械可靠性的研究始于20世纪60年代初期。其发展与美国的航天计划密切相关。当时,机械故障和电子-机械故障是NASA(宇航局)主要关心的事。因为由于机械故障而引起事故很多,损失巨大。例如,1963年,同步通信卫星SYNCOM I号由于高压容器破裂引起的故障,在空中坠毁;1964年,人造卫星水星III号也因机械故障而失效;在Gemini飞船系统中零件的故障频繁,如阀门、调节器等。因此,从1965年起,NASA开始进行以下几项机械可靠性研究:①用过载试验方法进行可靠性验证;②在随机动载荷下结构和零件的可靠性;③把规定的可靠度目标值直接设计到应力分布和强度分布都随时间变化的机械零件中去。

在20世纪60年代初到80年代初的20年间,D. Kececioglu在机械可靠性领域做出了很多的贡献,主要包括以下方面:

1) 研究了应力-强度分布干涉理论在机械可靠性领域的应用,并在为NASA进行的研究项目的基础上,提出了一套比较完整的以干涉理论为根据的机械可靠性设计方法和步骤,明确地提出了“把可靠度直接设计到零件中去并进而设计到系统中去”的方法。这一方法在工程中得到了广泛应用。

2) 通过实验,指出了通常对数正态分布或威布尔分布能很好地表示零件失效循环次数的分布。阐明了把不同应力水平下的失效循环次数分布转化为规定寿命下强度分布的方法和步

骤；已知疲劳应力幅、失效循环次数分布和寿命要求，求疲劳应力下可靠度的计算方法；已知强度分布和最大疲劳应力幅，求规定寿命下可靠度的计算方法。

3) 对于顺序加载下的累积疲劳，提出了用“条件可靠度-等效寿命”，进行可靠度计算的方法。

4) 对于长期寿命下的强度分布，通过对几种曲线（Goodman、Von-Mises-Hencky 椭圆和 Gerber 抛物线）的比较，提出了对疲劳强度均值的实验数据的最佳拟合线，在有的《机械设计》教科书上被称为 Kececioglu 曲线。

5) 为海军某部研究了花键在规定工作寿命下的磨损量分布和在规定磨损量下的工作寿命分布，提出了对于所期望的工作寿命或允许磨损量预测花键联接可靠度的方法。

6) 在 20 世纪 70 年代后期，研究了应力和强度都为二维分布的干涉模型。

除了在机械可靠性领域的卓越贡献以外，D. Kececioglu 也是公认的当代资格最深的可靠性教育家。

E. Haugen 是 Kececioglu 的同事，也是概率机械设计领域的先驱者之一。其著作被广泛引用。其代表作有 1968 年 Wiley 版的《设计的概率方法》，和 1980 年 Wiley 版的《概率机械设计》。后者有中译本（上海交通大学汪一麟译）。Haugen 还为中文版写了序言。

自 1980 年开始，加拿大的 B. S. Dhillon 对一些专题进行了研究，包括“应用于机械系统的干涉理论”（1981）、“统一的可用性模型：具有机械、电气、软件、人为因素和共因失效的冗余系统”（1981）、“具有共因失效的系统的概率分析”（1982）、“冗余系统的应力-强度可靠性分析”（1980），和“具有部分故障的地面运输系统的可靠性模型”（1986）。他的研究课题和专著还有“人的可靠性”、“地面运输系统的可靠性”、“机器人的可靠性和安全性”、“医疗设备的可靠性”等。

此外，K. C. Kapur 的《Reliability in Engineering Design》（1977）和 W. Nelson 的代表作《Applied Life Data Analysis》（1982）等都是常被引用的名著。

进入 21 世纪以来，机械可靠性发展比较缓慢，没有引人注目的发展。在一年一度的 R&M 年会上，有一种趋势值得注意：即国防部门的参加人数逐渐增多。

在英国，A. D. S. Carter 是机械可靠性领域的先驱者和代表人物，其主要著作是《机械可靠性》（1972、1986、1997）。他的主要观点有：

1) 磨损应是机械可靠性的主要研究方向，因为磨损考虑到机械失效的大多数，它是一个复杂的过程，呈明显的非线性，人们对其全面的理解不够，对磨损的最后阶段知道的很少。至于是什么主宰了磨损失效的模型，几乎全是经验主义。

2) 简化应当提供最好的方法。介绍更为复杂的模型是错误的决定，除非它们能更接近真实情况。问题在于我们并不知道真实情况是什么：我们不知道载荷分布和强度分布尾部的形状，而可靠度却非常依赖于它们；我们不充分理解磨损的机理和控制因素；我们不能为磨损-寿命失效模型定量。更进一步，由于有多种物理上不同的磨损机理，因而需要更多的模型。

3) 恒定失效率方法在机械可靠性中只能起较小的作用。持续不断地依赖恒定失效率方法在机械可靠性领域更多地阻碍了进步。

4) 维修影响可靠性，在实现机械可靠性的过程中，维修的重要性被低估了。

1997 年，A.D.S.Carter 在其新作《机械可靠性与设计》中对磨损的可靠性作了进一步的阐述。A. D. S. Carter 是英国皇家军事科学学院的教授，他的活动主要是在英国。

另一位代表人物 P. O'Connor 却活跃在美国,其代表作为《Practical Reliability Engineering》(1981、1986、1991、2002)。

日本是在民用工业中应用可靠性工程最成功的国家,在机械和电子-机械可靠性领域应用也非常成功,如汽车、工程机械、机器人等。日本的经验从一个侧面说明了理论必须与实践相结合,而有时“经验比理论更重要”。20世纪90年代初,额田启三曾三度访华,介绍有关机械可靠性方面的经验,对当时国内机械可靠性的推广应用,有很大的帮助。

(2) 国内情况 国内最早的可靠性研究机构是1965年受命于钱学森,由何国伟负责筹建的航天可靠性与质量控制研究所。在1978年举行的全国科学大会上,可靠性领域的代表仅有2人。与国外一样,国内机械可靠性的发展比电子可靠性缓慢,起步较晚。1982年12月,原机械工业部沈烈初副部长在一次会议上提到:“至于可靠性设计,基本上处于空白,不论是理论还是方法,都未掌握。”1983年3月,在北京召开了第一次《机械可靠性座谈会》,由航天部质量司何国伟总工程师作了主题报告。1984年,原机械工业部科技司长姚福生率团赴日本考察机电产品的可靠性。1986、1987、1988连续3年召开了三次机械工业部可靠性工作会议。1986年11月,原机械工业部发出了《关于加强机电产品可靠性工作的通知》。1987年,又先后5次发出了《关于限期考核机电产品可靠性指标的清单》,共涉及754种机电产品。

1987年,机械科学研究院成立了以顾唯明、孙惠琴为总师的可靠性中心。1988年,中国机械工程学会下设的可靠性工程学会成立,由原机械工业部郭志坚副总师兼任主任委员(筹备期间,曾由范宏才副总师兼任),机械科学研究院雷慰宗总师等为副主任委员。1989年,中国科学技术协会、中央电视台、中国质量管理协会等六单位主办了中央电视台《可靠性工程与管理》电视讲座和函授班,由傅光民、裘履正任教研组长,共开设了9门课程。同期,北京航空航天大学成立了由杨为民教授任所长的可靠性工程研究所(1984),兵器、造船等工业部门也成立了质量与可靠性机构。所有这些活动,都非常有力地推动了机电产品可靠性工作的开展和普及。

国内最早开出《机械可靠性设计》课程的是范垂本(1978年,北京钢铁学院,今北京科技大学)。在机械和结构领域,20世纪80年代最早的可靠性著作是凌树森所著《可靠性理论及其在机械工程中的应用》,而最具有代表性的著作是《机械强度可靠性设计》(徐灏,1984)、《疲劳应用统计学》(高镇同,1986)和《机械零件可靠性设计》(牟致忠,1988)。

《机械零件可靠性设计》是本书作者在美国进修可靠性工程两年的学习结果,书中以 D. Kececioglu 的理论和方法为主线,同时包含了 E. Haugen 和 C. Lipson 的著作要点,当时为国内仅见。此书也是以后编写1989年中央电视台《可靠性工程与管理》电视讲座与函授班教材《机械可靠性》、1989年北京机械工程师进修大学教材《机械可靠性工程基础》、15学时教学录像带、1993年国家教委机械设计和制造专业教材《机械可靠性设计》以及1996年《机械工程手册》机械设计基础篇可靠性设计篇的基础。

近十几年来,由于国势日强,在机械和结构可靠性领域新人辈出,他们已将可靠性理论和实践推向了新的高度,更多地出现在国际学术会议上,并在多种国际刊物中发表了许多有影响的学术论文,其中最具有代表性的是谢里阳(东北大学)、熊峻江、张建国(北京航空航天大学)和成都电子科技大学的同行们。

3. 机电产品可靠性研究的发展趋势

在过去的半个多世纪内,可靠性工程已经显示出其在各种不同情况下的价值。它是一种

为了各种理由的技术。

机电产品可靠性研究的发展趋势有以下几个方面：

1) 计算机辅助可靠性设计。由于对软件的依靠增加了，所以对软件可靠性的研究日益得到了重视。最新的发展史试图把硬件可靠性和软件可靠性综合到整个系统的可靠性量度中去。可以期望未来的 CAD 系统将能提供考虑了所有因素（其中也包括可靠性）的机械设计和电路设计解决方案。CAD 数据库将提供可靠性预计、分配、FMECA、FTA、潜在电路分析和其他要求的分析。

2) 进一步完善现有的概率设计方法。主要包括以下几个方面：

① 当应力分布和强度分布不属于同一分布类型时，改进合成两种不同分布的方法。

② 当零部件的失效模式不止一种时，其可靠度的确定方法。

③ 冗余系统的应力-强度干涉模型和概率分析。

④ 具有共因失效系统的概率分析。

⑤ 随机载荷下零部件的载荷谱分析和强度分析的确定等。

3) 其他应用科学的理论和方法在可靠性工程中的进一步结合应用，如概率断裂力学、摩擦学、随机振动学、Monte Carlo 模拟、虚拟样机技术、稳健设计等。

4) 可靠性与产品性能的综合研究，如性能可靠性、贮存可靠性等。

5) 进一步改进和完善可靠性数据库，编制出有实用价值的非电子产品（包括机械产品）可靠性手册。

1.1.3 可靠性与质量管理的关系和区别

1. 可靠性与质量管理的关系

广义质量包含了可靠性。从历史的发展来看，可靠性是在质量管理的基础上发展起来的。

传统的质量管理大致经历了三个阶段。第一阶段是 20 世纪初开始的“事后检验”阶段。其理论依据是 1911 年美国人泰勒 (F. W. Taylor) 发表的“科学管理原理”。美国在质量管理上采取的第一个重大步骤是设立“中心检验部门”。在第一次世界大战 (1913—1917) 以后的二十多年内，一直到 20 世纪 40 年代初，大多数工业企业都这样做了。

第二阶段是“统计质量管理 (SQC)”阶段。1924 年，休哈特 (W. A. Shewhart) 把统计理论运用到制造过程的产品质量控制中去，提出了质量控制图，标志着质量管理第二阶段的开始。在第二次世界大战期间，由于许多公司不能达到军工产品的质量要求和按期交货，因此引起了对“预防缺陷”的重视和对制造过程的监控，而使统计质量管理得以应用和推广。与此相应，在组织体制上，成立了“质量管理部”。

然而，在产品制造出来以后进行事后检验，只能剔除不合格品，不能提高产品本身的质量。在生产过程中通过抽样检验，及时对工序质量进行控制，能够做到少出废品，但是也不能提高产品的固有可靠性，因为产品的固有可靠性是由设计决定的。

20 世纪 50 年代，由于对产品的可靠性要求超过了常规方法所能达到的水平，传统的产品研发和设计方法已不能适用。现场使用的产品失效率很高，难以维护。于是，称为“可靠性工程师”的新型专业人员便应运而生，在美国兴起了“可靠性运动”。它涉及技术和管理两个方面。

20 世纪 60 年代初，菲根鲍姆 (A. V. Feigenbaum) 的代表作《全面质量管理 (TQC)》问

世,标志着质量管理第三阶段的开始。而日本则将 TQC 改为 TQM。

在质量管理从 SQC 向 TQC 转变的过程中,出现了以 TQC 为基础的质量保证(QA)制度,而可靠性成为质量保证的核心内容。其发展背景介绍如下:

1)产品保证制度的确立。1959年,美国开始实行汽车保用期制度,当时仅为 6400km(4000英里)或4个月,二者取其小。

2)消费主义的抬头。1962年,美国公布了消费者保护政策,赋予消费者四种权利,其中包括产品安全、产品要有可靠性、听取用户意见、产品要交底等。1966年,开始出现汽车退货事件。

3)从20世纪60年代起,汽车、彩电、冰箱、洗衣机等产品已成为家庭必需品,作为社会和民生的要求,迫使企业必须保证其产品安全,而重视和加强质量保证。

4)产品责任和索赔制度的建立。产品责任和巨额的索赔足以使企业破产。而保用期、索赔制、产品的安全性、可用性(可用率)等都是产品的可靠性为依据的。

2. 可靠性与质量管理的区别

可靠性与质量管理的第一个区别是时间因素和量度。虽然广义的质量定义中包含了可靠性,但是在绝大多数质量管理部门中抓的是传统质量或狭义质量,主要重点是要放在符合性质量,即“测量实际质量的结果与标准对比,并对差异采取措施的调节管理过程”。狭义的质量概念没有考虑时间因素。

我们知道,经过出厂前质量检验(最后检验)认为合格的产品,不能保证出厂后不发生故障。在买车时虽然购买的是中意的汽车,但买主并不知道它第一次发生停车故障是在几年或几个月之后。因此,狭义质量实际上是“出厂时的质量”或“今天的质量”。而可靠性是要保证“明天的质量”,即产品在出厂后的规定时间内(或里程数)的质量。例如,某品牌的汽车在行驶8万km后的失效概率为1%(即可靠度为99%),置信度为90%。

第二个区别是,传统的质量管理通常是从制造阶段开始的,主要的工作和活动是在制造阶段。它通过控制图、因果图、排列图等方法来降低加工过程的变异性,使工序得到控制而且稳定,以达到质量目标。

而可靠性必须从设计阶段开始,并且贯穿于设计、研制、制造、试验、运输、储存、使用、维修直到报废的全过程。可靠性主要取决于设计,必须在设计阶段把可靠性直接设计到零件、部件,从而设计到系统中去。如果设计不好,即使制造阶段的质量管理再好,其产品的固有可靠性也是较低的,常常不得不重新设计。1969年发生的日本汽车被美国退货事件中,从对产品质量的调查得出结论:由于设计原因而引起的故障占50%。所以,在TQM阶段,把设计质量放在符合性质量之前。汽车工业提供了设计质量不同的出色例子。Rolls Royce、Mercedes Benz、BMW、Cadillac 和 Lexus 代表了高设计质量。

第三个区别是,可靠性与质量管理的任务目标有所不同,因而两个部门的职能也有所不同。在ISO 9000中提到的质量体系要求,主要包括:质量方针、合同评估、设计控制、文件控制、采购、工序控制、检验和试验、不合格品的控制、纠正措施、质量记录、内部质量审核、售后服务等。关于可靠性部门的职能将在可靠性管理一节中详述。

第四个区别是,两者常用的数学工具和统计方法有所不同,虽然它们都要应用概率论和统计学。可靠性使用较多的概率分布,如指数分布、威布尔分布、极值分布等,而质量管理使用较多的线图,如控制图、因果图、排列图、工作特性曲线(OC)等。概率设计是可靠性