



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

信息化与工业化 两化融合
研究与应用

可靠性原理与方法

(上册)

孙有朝 张永进 李龙彪 编著



科学出版社



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

信息化与工业化两化融合研究与应用

可靠性原理与方法

(上册)

孙有朝 张永进 李龙彪 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书在跟踪可靠性研究前沿的基础上,以航空、航天与民航为背景,结合数理统计与工程设计原理,系统地阐述了可靠性理论与工程应用方法。全书包括可靠性基本概念、可靠性统计基础、可靠性建模方法、复杂系统可靠性分析方法、关联系统可靠性原理、面向过程的系统可靠性、可靠性预计与分配、机械可靠性设计、可靠性试验与评定、可靠性物理与失效分析、安全风险评估与管理等,给出了近年来在航空、航天与民航领域成功应用的典型可靠性工程案例。

本书可供从事机械和电子产品可靠性设计、制造、实验和管理的工程技术人员使用和参考,也可作为高等工科院校机械、电子、自动化、航空、航天、民航、船舶等相关专业高年级本科生、硕士和博士研究生的教材和教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

可靠性原理与方法.上册/孙有朝,张永进,李龙彪编著. —北京:科学出版社,2016

(信息化与工业化两化融合研究与应用)

ISBN 978-7-03-048420-8

I. ①可… II. ①孙…②张…③李… III. 可靠性理论 IV. ①O213.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 119783 号

责任编辑:魏英杰 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 倩 / 封面设计:陈 敬

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 5 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016 年 5 月第一次印刷 印张:16 1/4

字数:324 000

定价:120.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

“信息化与工业化两化融合研究与应用”丛书编委会

顾问委员会 戴汝为 孙优贤 李衍达 吴启迪 郑南宁 王天然
 吴宏鑫 席裕庚 郭 雷 周 康 王常力 王飞跃

编委会主任 吴 澄 孙优贤

编委会副主任 柴天佑 吴宏鑫 席裕庚 王飞跃 王成红

编委会秘书 张纪峰 卢建刚 姚庆爽

编委会委员（按姓氏笔画排序）

于海斌（中国科学院沈阳自动化研究所）	张纪峰（中科院数学与系统科学研究院）
王 龙（北京大学）	陈 杰（北京理工大学）
王化祥（天津大学）	陈 虹（吉林大学）
王红卫（华中科技大学）	范 铠（上海工业自动化仪表研究院）
王耀南（湖南大学）	周东华（清华大学）
卢建刚（浙江大学）	荣 冈（浙江大学）
朱群雄（北京化工大学）	段广仁（哈尔滨工业大学）
乔 非（同济大学）	俞 立（浙江工业大学）
刘 飞（江南大学）	胥布工（华南理工大学）
刘德荣（中国科学院自动化研究所）	桂卫华（中南大学）
关新平（上海交通大学）	贾 磊（山东大学）
许晓鸣（上海理工大学）	贾英民（北京航空航天大学）
孙长银（北京科技大学）	钱 锋（华东理工大学）
孙彦广（冶金自动化研究设计院）	徐 昕（国防科学技术大学）
李少远（上海交通大学）	唐 涛（北京交通大学）
吴 敏（中南大学）	曹建福（西安交通大学）
邹 云（南京理工大学）	彭 瑜（上海工业自动化仪表研究院）
张化光（东北大学）	薛安克（杭州电子科技大学）

“信息化与工业化两化融合研究与应用”丛书序

传统的工业化道路,在发展生产力的同时付出了过量消耗资源的代价:产业革命 200 多年以来,占全球人口不到 15% 的英国、德国、美国等 40 多个国家相继完成了工业化,在此进程中消耗了全球已探明能源的 70% 和其他矿产资源的 60%。

发达国家是在完成工业化以后实行信息化的,而我国则是在工业化过程中就出现了信息化问题。回顾我国工业化和信息化的发展历程,从中国共产党的十五大提出“改造和提高传统产业,发展新兴产业和高技术产业,推进国民经济信息化”,到党的十六大提出“以信息化带动工业化,以工业化促进信息化”,再到党的十七大明确提出“坚持走中国特色新型工业化道路,大力推进信息化与工业化融合”,充分体现了我国对信息化与工业化关系的认识在不断深化。

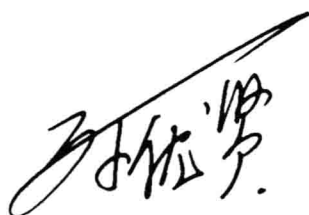
工业信息化是“两化融合”的主要内容,它主要包括生产设备、过程、装置、企业的信息化,产品的信息化和产品设计、制造、管理、销售等过程的信息化。其目的是建立起资源节约型产业技术和生产体系,大幅度降低资源消耗;在保持经济高速增长和社会发展过程中,有效地解决发展与生态环境之间的矛盾,积极发展循环经济。这对我国科学技术的发展提出了十分迫切的战略需求,特别是对控制科学与工程学科提出了十分急需的殷切期望。

“两化融合”将是今后一个历史时期里,实现经济发展方式转变和产业结构优化升级的必由之路,也是中国特色新型工业化道路的一个基本特征。为此,中国自动化学会与科学出版社共同策划出版“信息化与工业化两化融合研究与应用”丛书,旨在展示两化融合领域的最新研究成果,促进多学科多领域的交叉融合,推动国际间的学术交流与合作,提升控制科学与工程学科的学术水平。丛书内容既可以是新的研究方向,也可以是至今仍然活跃的传统方向;既注意横向的共性技术的应用研究,又注意纵向的行业技术的应用研究;既重视“两化融合”的软件技术,也关注相关的硬件技术;特别强调那些有助于将科学技术转化

为生产力以及对国民经济建设有重大作用和应用前景的著作。

我们相信,有广大专家、学者的积极参与和大力支持,以及丛书编委会的共同努力,本丛书将为繁荣我国“两化融合”的科学技术事业、增强自主创新能力、建设创新型国家做出应有的贡献。

最后,衷心感谢所有关心本丛书并为其出版提供帮助的专家,感谢科学出版社及有关学术机构的大力支持和资助,感谢广大读者对本丛书的厚爱。

A large, stylized handwritten signature in black ink, which appears to read '孙义章' (Sun Yizhang).

中国工程院院士

2010年11月

前 言

可靠性理论与方法是一门多学科交叉的新兴边缘性学科,涉及基础科学、技术科学、信息科学和管理科学诸多领域。

由于任何产品和技术,尤其是高科技产品、大型复杂系统设备,以及尖端技术的发展,都要以可靠性技术为基础,可靠性已经成为衡量产品质量和技术措施的重要指标之一。20 世纪 40 年代初期到 60 年代末期,是可靠性理论与工程发展的重要时期,1952 年,由美国军方、工业领域和学术领域三方共同组成了电子设备可靠性咨询小组(AGREE),并于 1957 年发表《军用电子设备可靠性》的研究报告,成为可靠性学科发展的奠基性文件和重要里程碑。20 世纪 60 年代到 80 年代,可靠性理论与实践进入全面发展阶段,拓展到与工程应用有密切关系的多学科领域。进入 20 世纪 80 年代,在机械可靠性、软件可靠性和微电子可靠性等领域进行了深入的研究,全面推广计算机辅助设计技术在可靠性中的应用,我国也从这一时期开始,逐步颁布了一系列可靠性工程技术标准和管理规定,在现代武器装备等大型系统研制中全面推行可靠性工程技术,使工程型号的可靠性工作进入规范化轨道,并得到迅速发展。自 20 世纪 90 年代以来,可靠性向着模块化、综合化、自动化、系统化、智能化的方向发展,形成了多学科交叉、渗透和融合的学科发展趋势。

近年来,国内出版了不少关于可靠性工程技术方面的论著,然而缺少对可靠性理论问题的论述及研究前沿的跟踪,本书全面阐述可靠性理论、方法、工程与应用,涵盖可靠性数学、可靠性工程、可靠性物理等内容,强调基本理论与技术的系统性、融合性和前瞻性,反映了可靠性研究前沿的最新理论与方法。

本书是作者在多年从事可靠性理论、方法、工程和技术应用的教学与科学研究工作基础上,经过凝练与整理完成的。全书内容涵盖可靠性统计,包括可靠性参数估计、可靠性数据统计分析、可靠性计数过程等;可靠性工程,包括系统可靠性建模、复杂系统可靠性分析、关联系统可靠性、面向过程的系统可靠性、可靠性预计与分配、可靠性实验与评定、机械可靠性设计、安全风险评估与可靠性管理等;可靠性物理,包括材料/器件的性能退化、机械与电子的失效机理与失效模型,以及基于失效机理的元器件可靠性设计改进技术等。给出了近年来在航空、航天与民航领域成功应用的典型可靠性工程案例。

感谢国家自然科学基金、工信部民机专项、国防基础科研计划、国防技术基础、民航局科技计划等对课题组可靠性领域相关项目给予的资助。在写作过程中,参阅了国内外同行专家、学者的大量科技文献、著作、手册和教材等,在此一并致以诚

挚的感谢。

由于作者水平有限,疏漏及不妥之处在所难免,敬请广大读者批评指正!

A stylized handwritten signature in black ink, consisting of several fluid, connected strokes.

2015 年 6 月

目 录

“信息化与工业化两化融合研究与应用”丛书序

前言

第 1 章 可靠性概论	1
1.1 可靠性工程发展简史	1
1.2 五性及与其相关概念	1
1.3 可靠性与维修性基本特征量	13
1.4 可靠性中常用统计量及其分布	17
第 2 章 可靠性统计原理	28
2.1 随机变量特征数	28
2.2 基本抽样分布	34
2.3 顺序统计量及其分布	41
2.4 参数估计	44
2.4.1 点估计的优良性	46
2.4.2 区间估计	50
2.5 可靠性数据的回归分析	52
2.5.1 一元线性回归模型	52
2.5.2 多元线性回归模型	58
2.5.3 非线性问题的线性回归	64
2.6 截尾数据及其统计分析	68
2.6.1 截尾类型与定义	68
2.6.2 I 型截尾	69
2.6.3 II 型截尾	70
2.6.4 随机截尾	71
2.6.5 一般性截尾过程	72
2.6.6 估计模型的检验方法	74
2.7 可靠性中的计数过程	76
2.7.1 齐次 Poisson 过程	76
2.7.2 非齐次 Poisson 过程模型	78
2.7.3 其他型 Poisson 过程简介	84
2.7.4 更新过程	85

第3章 不可修系统可靠性模型	87
3.1 系统可靠性功能逻辑图	87
3.2 串联系统	91
3.3 并联系统	93
3.4 混联系统	95
3.5 表决系统(r/n)	97
3.6 贮备系统	99
3.6.1 冷贮备系统	99
3.6.2 温贮备系统	105
3.6.3 热贮备系统	107
3.7 网络系统	109
3.7.1 全概率分解法	109
3.7.2 布尔真值表法	110
3.7.3 最小路集法	113
3.7.4 最小割集法	114
第4章 可修系统可靠性模型	116
4.1 马尔可夫过程	116
4.1.1 马尔可夫过程基本概念	117
4.1.2 极限概率及各状态遍历性	118
4.1.3 过渡状态的概率	121
4.1.4 吸收状态时的平均转移次数	123
4.1.5 连续型马尔可夫过程	125
4.2 单部件可修系统	127
4.3 典型可修复系统可用度	129
4.3.1 串联系统可用度	129
4.3.2 并联系统可用度	131
4.3.3 表决系统可用度	134
4.3.4 旁联系统可用度	135
4.4 系统维修周期	139
4.4.1 定时拆修与定时报废	139
4.4.2 全部定时更换的间隔期	142
第5章 复杂系统可靠性分析方法	146
5.1 故障模式、影响及危害性分析	146
5.1.1 概述	146
5.1.2 故障模式与影响分析	146

5.1.3 危害性分析	150
5.1.4 FMECA 应用示例	154
5.2 故障树分析	155
5.2.1 概述	155
5.2.2 建立故障树的方法	158
5.2.3 故障树的定性分析	161
5.2.4 故障树的定量分析	167
5.2.5 故障树和可靠性框图的关系	169
5.3 基于 Bayes 方法的可靠性分析	171
5.3.1 Bayes 统计分析方法	172
5.3.2 Bayes 网络分析方法	178
5.4 模糊可靠性分析方法	181
5.4.1 模糊可靠性的基本概念	181
5.4.2 模糊可靠性基本指标	183
5.4.3 模糊可靠性模型	187
5.4.4 系统模糊可靠性分析	193
5.5 信息融合的可靠性分析法	200
5.5.1 多来源可靠性数据分析	200
5.5.2 先验数据信息融合分析	202
5.6 基于 Petri 网的可靠性分析	206
5.6.1 Petri 网基本概念	206
5.6.2 Petri 网的图形表示	207
5.6.3 典型系统可靠性的 Petri 网模型	208
第 6 章 关联系统可靠性原理	213
6.1 多状态系统	213
6.1.1 三态系统	214
6.1.2 一般多态系统	217
6.2 单调关联系统	222
6.2.1 单调关联系统定义	223
6.2.2 基本性质	224
6.2.3 单调关联系统的数学描述	227
6.2.4 单调关联系统可靠度计算	231
6.3 单元的结构重要性	234
6.3.1 结构重要度	234
6.3.2 概率重要度	235

6.3.3 B-P 重要度	236
6.3.4 C 重要度和 P 重要度	236
6.4 失效相关	237
6.4.1 相关失效模式	237
6.4.2 相依性与协方差	240
6.4.3 相依性与 Copula 函数	242

第 1 章 可靠性概论

1.1 可靠性工程发展简史

可靠性理论源于电子技术,是第一次世界大战后出现的,首先被用于军用单缸飞机、双缸飞机及四缸飞机的安全性分析方面,近年来发展到机械技术与现代工程管理领域,成为一门新兴的边缘学科^[1]。

20 世纪 30 年代初,Shewhart 等成功地采用统计方法代替理论分析,对工业产品的质量进行评估,但是这种方法直到第二次世界大战后才得到大力推广。这时工业产品的复杂程度大大提高,出现了以电视机、电子计算机等为代表的复杂电子产品。随着汽车工业的发展,复杂系统的可靠性和安全性已经提到了研究日程^[2]。

20 世纪 50 年代末到 60 年代初,美国洲际弹道导弹和太空开发计划的发展,尤其是墨丘利计划和双子星计划的推进,使得人类首次登上了月球,并给可靠性的发展提供了良好的契机,国际上首个可靠性专业学术杂志 IEEE Transaction on Reliability 在 1963 年问世^[3]。

20 世纪 70 年代,美国和其他一些国家开始大力发展原子能,美国专门成立了以 Rasmussen 教授为首的研究小组开展对原子能安全风险评估方面的工作,数百万美元研究经费的投入造就了世界上第一份原子能安全风险评估报告,即著名的 Rasmussen 报告^[4]。

近年来,欧洲和亚洲各国在工业系统的可靠性和安全性领域也开展了大量有意义的工作,例如挪威海洋石油天然气及北海石油天然气开发等,使得深海设备的可靠性问题成为和太空飞船等航空航天设备等一样的研究热点^[5]。

1.2 五性及其相关概念

可靠性、维修性、安全性、保障性、测试性统称为五性,下面从各个特性角度介绍其相关概念。

1. 可靠性

可靠性的理论基础是概率论和数理统计,其任务是研究系统或产品的可靠程度,提高质量和经济效益,提高生产的安全性。国际标准化组织(ISO 8402)将可靠性定义为单元在给定的环境和运行条件下,在给定的时间内完成规定功能的能力。

单元既可以是一个元件、设备或者一个子系统,也可以是一个系统;给定的环境和运行条件包括使用条件、应力条件、环境条件和贮存条件等;时间一词也应从广义的角度去理解,可以是时间、次数、里程,如车辆的行驶里程、零件受到的应力循环次数等。

可靠性分析方法大致可以分为硬件可靠性、软件可靠性、人因可靠性^[6]。许多系统同时包括硬件、软件和人的因素(如设计者、操作者和维修者),本书主要涉及硬件可靠性中的部件与系统的可靠性。目前,硬件可靠性分析主要包括机理模型法和统计分析法。

机理模型法主要用于结构产品单元(如梁、桥、机械构件等)的可靠性分析,也被称为结构可靠性分析法(Melchers,1999)。在机理模型法中,涉及应力与强度两个基本概念。应力通常指引起系统或产品失效的外载荷。强度通常指产品抵抗失效的能力。产品的失效通常是由于其承受的载荷超过了产品在当前状态下极限承载能力^[7]。

定义强度与载荷分别为随机变量 S 和 s 。在时刻 t ,应力的的大小是一个不确定值,一个产品或系统的应力由若干构成,可抽象为随机变量组成的多元随机函数,它们都具有一定的分布规律,如图 1-1 所示。

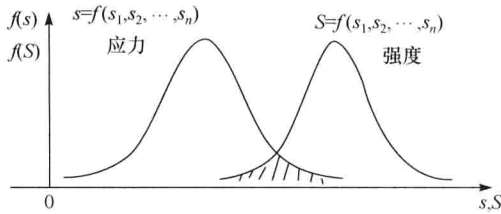


图 1-1 应力-强度分布规律

当应力大于强度时则失效,可靠度 R 定义为强度大于应力的概率,即

$$R=P\{S>s\}$$

应力和强度通常随时间变化,因此可以看作是时间的函数,分别记为 $s(t)$ 和 $S(t)$,其概率密度函数分别记为 $f(s)$ 和 $f(S)$ 。应力与强度的分布情况如图 1-2 所示,表示应力 s 与强度 S 分布与时间之间的关系。

失效时间 T 定义为到 $S(t)<s(t)$ 为止的(最短)时间,即

$$T=\min\{t;S(t)<s(t)\}$$

可靠度 $R(t)$ 定义为

$$R(t)=P(T>t)$$

统计分析法通过分析在失效时间 T 内荷载和强度的概率分布函数 $F(t)$ 获得

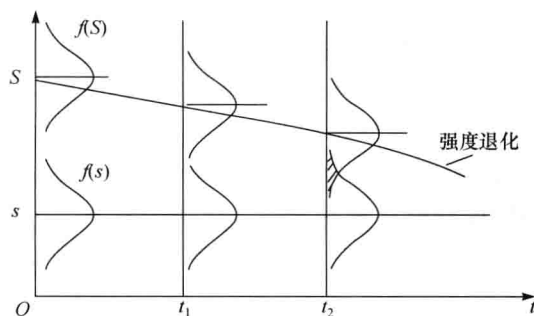


图 1-2 应力-强度分布与时间之间的关系

可靠性。评价可靠性的指标包括失效率(failure rate)、平均故障发生时间(mean time to failure, MTTF)和平均剩余寿命(mean residual life, MRL)等。

随着可靠性相关领域的发展,逐渐形成可靠性领域的四个相关研究方向。

① 可靠性数学,是研究与解决各种可靠性问题的数学方法与模型,涉及概率论、测度论、数理统计、随机过程和运筹学等相关学科知识^[8]。

② 可靠性物理,也称失效物理(physics of failure),主要是从失效的物理机理与原因等角度研究结构器件等的可靠性。

③ 可靠性工程,是对产品(元件、设备、系统、整机等)的失效及其发生的概率进行统计分析,是可靠性设计与实验评估、检验、控制、维修等行为,包含工程技术的应用型工程学科。

④ 可靠性管理,是指为确定和满足产品可靠性要求而必须进行的一系列计划、组织、协调、监督等工作,从制定设计方案、分配、优化等对产品或系统进行管理,对管理成功性提出概率和行为要求的软科学。

1980年美国军用标准将可靠性定义为任务可靠性与基本可靠性两类。把产品在规定的任务剖面内完成规定功能的能力,即执行任务时成功的概率定义为任务可靠性,而把在规定的条件下,无故障的持续时间与概率定义为基本可靠性。此外,也常见到如下一些其他的专门定义。

① 工作可靠性(operational reliability),产品运行时的可靠性,包含产品制造与使用两方面的因素。针对制造生产确定的可靠性,称为固有可靠性或潜在可靠性(inherent reliability),是厂商在模拟实际工作的标准条件下,对产品检测并给予保证的可靠性。与产品使用密切相关,在真实环境中表现出来的可靠性称为使用可靠性(use reliability)。

② 贮存可靠性,也称储存可靠性(storage reliability),通常针对长期贮存、一次使用的产品,如火药、导弹等产品,也有关于一些重要系统备件的可靠性问题,指在规定的贮存条件和时间内,保存其使用规定功能部件的能力。

③ 动态可靠性(dynamic reliability),描述系统或产品随时间变迁时表现出的可靠性,通常可用随机过程、随机 Petri 网等来描述和建模。

2. 维修性

维修性(maintainability)是指产品在规定的条件下和时间内,按照规定的程序和方法进行维修时,保持或修复到完成规定状态的能力,是一个重要的产品属性。在工程实践中,对维修性的任何定量度量一般都应该从概率统计的意义上理解^[9]。

① 规定的条件是指进行维修的不同的处所(即维修级别)、不同素质的维修人员、不同水平的维修设施与设备等所构成的实施维修的条件,也涉及与之关联的环境条件。

② 规定的时间是指直接完成维修工作需用时间所规定的限度,是衡量产品维修性好坏的主要度量尺度。

③ 规定的程序和方法是指针对同一故障,以不同的程序和方法进行维修,完成维修工作所需时间会有所不同,规定的程序和方法通常是经过优化的维修操作过程。

④ 规定的状态是指通过维修应保持或恢复的功能状态。

维修性作为产品性能的一种度量,既影响任务的完成,也影响维修费用的高低。因为维修的目的是使设计和制造出来的产品能够方便而经济地保持在或恢复到规定的状态,如果需要以过量的时间或过量的资源才能完成产品的维修工作,产品的维修性差,通过虚拟维修可以评估维修性的优劣,虚拟维修示例如图 1-3 所示。维修性的定性要求一般体现在以下几个方面。

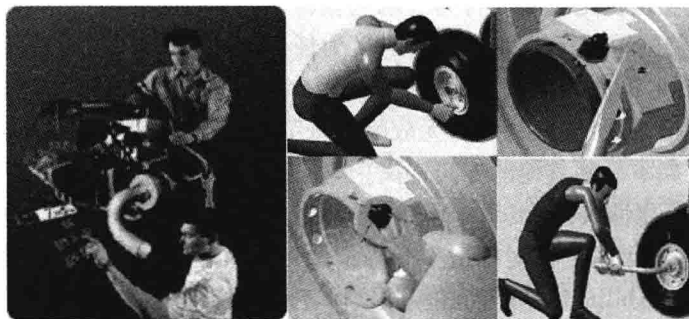


图 1-3 虚拟维修示例

① 可达性,即应易于接近需要进行维修的产品或部位,并具有进行检查、修理或更换等操作所需的活动空间。

② 标准化、互换性和通用性。

③ 防差错措施和识别标志,即从设计上采取措施,防止在维修过程中出现装错、装反或装漏等差错,在产品的适当部位加上明显的识别标志。

④ 维修安全性,保障维修工作人员的生命财产安全。

⑤ 检测诊断,即维修人员能对产品故障进行准确快速和简便的检测和诊断。

⑥ 零部件可修复性,即对于可修器件,在设计上可通过调整、局部更换零部件等措施使得零部件发生故障后易于修理。

⑦ 维修时可以减少维修内容,对维修工的技能要求不能太高。

定量的维修要求是与设计人员可控的设计特性相关联的,可以用不同的维修性参数表述定量的维修性要求,如维修时间、费用、故障的检测与隔离等相关参数。工程上通常用指数分布、正态分布和对数正态分布等描述不同维修情况的随机维修时间。

维修度是指可修产品发生故障或失效后,在规定的条件和时间 $(0, \tau)$ 内完成修复的概率,可用下式表示,即

$$M(\tau) = P, \quad T \leq \tau$$

其中, T 是在规定的约束条件下完成维修的时间; τ 是规定的维修时间;维修度 $M(\tau)$ 是对时间 τ 的累积概率,是 τ 的非降函数,如图1-4所示。

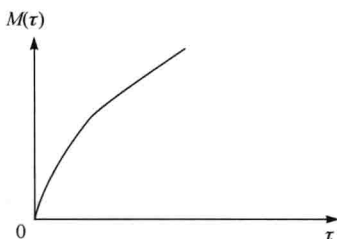


图1-4 维修度函数曲线

记 $m(\tau)$ 为单位时间内产品被修复的概率,则有

$$m(\tau) = \frac{dM(\tau)}{d\tau}$$

维修的修复率 $\mu(t)$ 为

$$\mu(\tau) = \frac{1}{1-M(\tau)} \cdot \frac{dM(\tau)}{d\tau} = \frac{m(\tau)}{1-M(\tau)}$$

其中, $1-M(\tau)$ 表示 τ 时刻未完成修复的概率。

维修度与修复率之间的关系为