

机电产品 可靠性技术

孙乐仁 编著

机电工程
新技术
基础丛书

22



本书论述了机电产品可靠性技术的基本内容。除必要的可靠性基础知识外,重点论述了机电产品的可靠性设计、可靠性选材、可靠性在疲劳分析中的应用、概率断裂力学、维修性和可靠性管理等课题。

书中叙述了切实可用的、近期的机电产品可靠性技术。通过许多实例来说明可靠性概念和可靠性设计方法,并帮助读者理解可靠性的原理及提高解决实际问题的能力。不少实例都是近年来我国机电产品可靠性研究、试验的结果,较符合我国的国情。采用了国家标准中的术语定义和方法。因此,本书可供具有高中以上文化程度的技术人员、企业领导和管理干部阅读;也可供大学、短训班作为教材或教学参考书。

机电产品可靠性技术

孙乐仁 编著

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南里一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

中国农业机械出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 850×1168 1/32·印张 8 3/4·字数 226 千字

1987年3月北京第一版·1987年3月北京第一次印刷

印数 00,001—3,800·定价 2.20 元

统一书号: 15033·6621

《机电工程新技术基础丛书》出版说明

科学技术的飞速发展,要求在机械工业部门从事技术和管理工作的干部学习和了解有关专业的新水平、新成就、新技术、新知识。为了贯彻机械工业“上水平、上质量、上品种、提高经济效益”这个总方针,帮助在职工程技术人员学习业务,更新知识,更好地为祖国的四化建设服务,我们特组织编写了这套《机电工程新技术基础丛书》,第一批将陆续出版十七种,这十七种书是:《工程数学方法》、《弹性塑料力学》、《机械优化设计》、《电机、电器优化设计》、《机电产品可靠性技术》、《环境污染与治理》、《材料科学及其新技术》、《数控技术》、《微型计算机应用技术》、《电子电路技术》、《自动控制工程》、《系统工程概论》、《管理数学》、《技术经济分析》、《能源利用与开发》、《液压传动与控制》、《测试技术》。

这套丛书的读者对象,主要是六十年代以来的大学和中专毕业生,现在从事机电产品的设计、制造工艺、技术改造、设备维修、质量管理、技术管理等工作的工程技术人员。

丛书内容着重于七十年代以来机电工程和管理工程有关学科的最新发展。在重视阐明物理概念的基础上,介绍新技术,新理论的应用,以及如何进行有效管理和提高经济效益。为了适应更多读者的需要,丛书以介绍基础性知识为主,不过多地作专业理论的探讨和论证,使它既可以作为在职技术干部和管理人员的培训教材,又可兼顾自学需要,使具有一般高等数学、普通物理知识的读者能够看懂。

由于条件和水平所限,丛书内容难免有不妥之处,希望读者提出宝贵意见,帮助我们改进提高。

前 言

机械工业是发展国民经济的基础工业。各行各业的装备、更新改造、供应广大的消费市场和国防建设都需要有性能好、品种多、质量高、成本低的机电产品。质量是机电产品的生命，这是作者从事航空产品质量工作三十年来的深刻体会。机电产品的可靠性又是质量的主要内容。机电产品的可靠性技术，在近期得到迅速的发展，已成为一门新兴的学科，越来越受到人们的重视。在产品指标的综合平衡中，可靠性所占的地位越来越显得重要，有时即使牺牲些其它指标也要保证产品的可靠性。

本书内容涉及机电产品可靠性技术的基础知识。论述了为什么要研究、提高机电产品可靠性和如何提高机电产品可靠性两方面的问题。采取理论与实际相结合的原则，以定性说明物理意义为主，少用数学推导，文字上尽可能作到深入浅出，通过实例说明问题，加深概念的理解；内容上以可靠性设计为中心，叙述了切实可行的、近期的机电产品可靠性技术。除必要的可靠性基础知识外，重点论述了机电产品可靠性设计、可靠性选材、可靠性在疲劳分析中的应用、概率断裂力学、可靠性管理和维修性等方面的内容；并且尽量要求定义、概念上严格准确，并采用国家标准中的名词术语和方法。

近年来，机电产品可靠性技术处于发展阶段。国外工科大学已作为保证科学的重要组成部分列为必修课程（保证科学主要包括质量控制、可靠性技术、安全性、经济性和可维护性等内容）。国内关于机电产品可靠性技术的书还不多，本书对机械工业的企业领导、管理干部、技术人员会有一定的参考价值。

由于新技术的迅速发展，作者水平有限，不足和错误之处衷心希望读者提出宝贵意见。

本书承河北工学院陆俭国同志审阅，表示感谢。书中第六章第五节和第九章第一、七节为四川省机械工程学会维修专业委员会副主任严守本同志撰稿，并对书中维修性方面内容提出了有益的意见。

目 录

第一章	可靠性概论	1
§ 1-1	为什么要研究机电产品的可靠性	1
§ 1-2	产品的可靠性和度量	5
§ 1-3	可靠性工程的发展史	10
§ 1-4	失效模式	13
§ 1-5	可靠性与有效性	15
§ 1-6	可靠性工作程序	16
§ 1-7	可靠性与成本	18
第二章	可靠性数学	20
§ 2-1	概率	20
§ 2-2	概率分布	29
§ 2-3	常用可靠性分布函数	38
§ 2-4	置信度	62
§ 2-5	统计假设检验	63
§ 2-6	分布检验(拟合度)	72
第三章	应力—强度干涉	82
§ 3-1	应力—强度的分布	82
§ 3-2	应力—强度干涉分析	85
§ 3-3	可靠性系数和应力分散系数对可靠性的影响	87
§ 3-4	随时间变化的应力—强度干涉	91
§ 3-5	蒙特—卡洛法的应用	94
第四章	可靠性预测	97
§ 4-1	零件的可靠性预测方法	97
§ 4-2	系统的可靠性预测	100
§ 4-3	复杂系统的分析	106
§ 4-4	预测精度	109
第五章	系统可靠性分配	111
§ 5-1	等同分配法	111

§ 5-2	按相对失效率比的分配法	112
§ 5-3	AGREE分配法	114
§ 5-4	利用动态规划法作可靠度分配	116
第六章	可靠性设计	121
§ 6-1	可靠性指标	122
§ 6-2	失效模式、影响及后果分析(FMECA法)	123
§ 6-3	失效树分析 (FTA法)	126
§ 6-4	参数漂移和极值分析	134
§ 6-5	可靠性设计审查	137
§ 6-6	冗余设计	140
§ 6-7	减额使用和简化设计	141
§ 6-8	失效的预防	142
§ 6-9	可靠性关键零部件清单	143
§ 6-10	维修性设计	143
第七章	机电产品可靠性	149
§ 7-1	机械零件的可靠性设计	149
§ 7-2	可靠性选材	173
§ 7-3	概率断裂力学	177
§ 7-4	可靠性在疲劳分析中的应用	182
第八章	可靠性的衡量和改进	189
§ 8-1	成品试验	189
§ 8-2	加速寿命试验	210
§ 8-3	一次使用产品的可靠性验证	220
§ 8-4	失效数据记录	222
§ 8-5	非参数法	222
§ 8-6	可靠性增长的监控	227
第九章	可靠性管理	230
§ 9-1	企业的可靠性方针	230
§ 9-2	可靠性组织	232
§ 9-3	可靠性人员的配备	234
§ 9-4	可靠性合同 (协议)	234
§ 9-5	可靠性标准	235

§ 9-6	可靠性手册	237
§ 9-7	全寿命费用	237
附录1	标准正态分布表	239
附录2	χ^2 分布表	241
附录3	F 分布表	243
附录4	t 分布表	263
附录5	常用单位换算表	264
附录6	本书所用符号表	265
参考书目		267

第一章 可靠性概论

§ 1-1 为什么要研究机电产品的可靠性

机械工业是为国民经济各部门提供机器设备, 为国防建设提供军事装备, 为消费市场提供日用机电产品的综合性生产部门。机械工业的发展水平在很大程度上决定着各行各业技术水平的高低、发展速度的快慢和经济效益的大小。由此, 机电产品质量的好坏也就直接影响国民经济各部门和国防现代化的建设, 也与广大人民群众的生活密切相关。

新中国成立后, 经过三十多年的努力, 我国机械工业从修配到制造、从仿制到自行设计、从制造单机到生产成套设备、从大量进口到扩大出口, 发展很快, 取得了显著的成就。

为了实现到本世纪末工农业总产值翻两番的宏伟目标, 当前机械工业面临着三个突出任务: 一是无论是重点建设, 还是现有企业的技术改造, 都要求机械工业提供新的技术装备, 研制一批急需的成套设备; 二是翻两番的前提是要提高经济效益, 提高产品质量, 降低物质消耗, 这就必须依靠技术进步, 要广泛采用新技术、新工艺、新材料、新设备, 加速产品的更新换代; 三是实行对外开放, 对内搞活经济的方针, 就要择优安排生产和择优选购, 并与国外产品开展激烈竞争。这种形势迫切要求机械工业提高机电产品的质量。但是机械工业产品质量的现状, 同这种形势还很不适应。一些产品质量问题还很多, 真正达到国外七十年代末、八十年代初水平的产品只占10%。提高机电产品的质量是加速产品更新换代的基础。

按国家标准 GB3935.1-83《标准化工作导则 标准化基本术语》, 质量定义为“产品、过程或服务满足规定要求的特征和特征的总和”。一个产品能否满足规定要求的特征, 主要从两个方

面考核:一是产品的性能是否达到满足功能要求的各项技术指标;二是在工作中能否继续满足功能要求,即技术指标保持的程度和产品损坏情况。前者是产品的性能问题,后者就是产品的可靠性问题。我们在工作或生活中经常会遇到这种情况:一个产品刚开始使用时性能符合要求,工作一段时间后性能就达不到要求了,甚至出现故障。这就是产品的可靠性有问题。可见,可靠性是与时间有关的质量指标。可靠性就是研究在一定时间内产品能满足规定功能要求的可能性有多大,产品不能满足规定功能要求的原因是什么,怎样求得改善。因此,可靠性是产品质量的重要内容。

可靠性发展的技术背景可归纳为以下几个方面:

1. 产品越复杂,可靠性问题就越突出

近几十年来,科学技术迅速发展,要求一些设备具有非常优良的性能。因此,这些设备的结构就变得非常复杂,所采用的零部件数量也相应增多。例如,阿波罗宇宙飞船总共使用了710万个以上的零件。除了储备系统之外,一个零件发生故障,就有可能影响设备某些功能的实现。因此随着设备零件数量的增加,设备的可靠性也会相应降低。可靠性就更加突出。如果每个元件的可靠度达到0.995,当设备由100个这样的元件组成时,整个设备的可靠度将是0.995的100次方,即只有约0.6。反之,如果一个由30万个元件组成的设备,要求达到可靠度为0.95,则其每个元件的可靠度应大于0.999999。

2. 产品越讲究经济效益,对可靠性要求就越高

设备可靠性的提高,可大大减少设备的维修费用。据美国五十年代的调查,一些设备的维修总额,在五年内可达该设备价值的十倍以上。1961年美国国防预算中至少有25%用于维修方面。如果适当提高产品的可靠性,将会节约大量的维修费用。例如,美国塔康的电子设备系统,原来的平均无故障工作时间为17 h,每台设备使用2000 h的维修费用为15560美元,后来提高了可靠性,平均无故障工作时间提高到150 h,就使维修费用降低到1818美元,即降低了80%。波音727飞机上的自动导航设备的可靠度高

达0.99999, 所以维修费用很低。

由于科学技术的进步, 许多设备具有更高级的性能, 结构更加复杂, 价格也更为昂贵。这样的设备如果出现故障, 往往要造成巨大的经济损失, 甚至引起严重的人员伤亡事故。因此它们的可靠性就显得更为重要了。

3. 采用新材料、新工艺越多, 就越要加强可靠性的研究

产品越先进, 采用的新材料、新工艺也越来越多。而尚未注意到的、没有研究开发的领域也增多。所有这些都是产生不可靠、不安全的因素。因此更要加强可靠性的研究。

4. 使用条件越多变、越恶劣, 就越要强调可靠性的研究

随着科学技术的发展, 产品的使用条件、使用环境也越来越广泛、多变、恶劣。如有些产品处于超高(低)压、超高(低)温等环境下工作; 人造卫星、航天飞机、超音速飞机等要在特殊气象条件下运行; 原子能动力站的工作环境更为恶化。因此, 环境条件对产品可靠性的影响就更加明显。有关资料表明: 电子设备的失效率如以实验室条件下为1, 在野外使用时就为2倍, 军舰上则为10倍, 飞机上则为20倍, 用于火箭上将增加到150倍。因此, 苛刻的使用条件对产品可靠性的要求越来越高。

从上述情况可看出, 对产品可靠性研究要求越来越迫切。但要定量地解决这个问题, 也只有在科学技术发展到一定阶段时才能有解决的办法。也就是说, 可靠性学科的发展是和系统工程学、安全工程学、运筹学、价值工程学、环境工程学、人一机工程、质量管理、生产组织技术、电子计算机技术和其他的管理技术有着密切的联系, 是和概率论与数理统计、物理学、化学、机械学等学科的发展密切相关的。如由于原材料、制造过程和使用条件的变化都使产品承受着不可避免的变动性。研究变动的规律和变动引起的后果对解决可靠性问题是十分必要的。这就需要在概率论和数理统计的应用上达到能够解决较复杂问题的程度。

由于以上这些理由, 可靠性理论和方法的研究在当前是现代工程的一个基本的组成部分。

机电产品可靠性问题的提出比电子产品要迟些。从六十年代开始, 由于航空、航天设备的研究, 可靠性的理论和方法逐渐被引进到机电产品和结构工程中来。主要原因是电子产品的可靠性提高后, 机电产品的可靠性问题突出了; 机电产品复杂性增加; 零部件增多从而使相应的可靠性下降; 机电产品的工作条件日益严酷, 如高温、低温、高速、振动、腐蚀、辐射等; 对机电产品的要求日益提高, 既要求尺寸小、重量轻, 又要求性能良好, 价格低廉, 而且还要高度可靠。例如, 过去为了提高机械零件可靠程度, 采取加大安全系数的办法, 而现在产品受到重量、体积、成本的限制, 安全系数不能不受限制地加大, 有些产品的安全系数已非常低, 如航空产品零件的安全系数一般为 $1.25 \sim 1.5$, 宇航零件仅为 1.10 。用这样小的安全系数时, 了解应力和强度的分布以及它们的关系便非常重要, 这就要采用可靠性设计。

人们对机械破坏机理的认识, 以及对机械及其零件的失效规律的了解日益深化; 同时通过实践也积累了大量现场使用的失效资料; 还成功地应用概率理论来作机械及其零件的可靠性分析。因此, 近年来机电产品可靠性研究逐渐有了进展。可靠性理论的分析方法和设计已应用于人造卫星、宇航设备、飞机、船舶、常规动力站、核动力站、车辆、压力容器、电机、汽轮机转子、齿轮和轴承等机械零件。在结构设计、强度分析、寿命估计、断裂力学和材料、工艺的选择方面都运用了概率统计方法, 引入了可靠性的概念。例如, 1969年美国阿波罗号登月舱在月球表面着陆, 成功的重要原因之一是可靠性技术的提高。在一些先进飞机的设计中都已采用了可靠性技术, 如美国海军研制F-18超音速战斗机时, 从研制计划一开始就把可靠性及维修性看得与飞机性能参数一样重要, 并开展严格的可靠性设计。其3000 h飞行试验结果表明, F-18飞机的平均无故障飞行时间为3.5 h, 比在研制中没有进行严格的可靠性设计的F-4E战斗机高3倍; F-18战斗机每飞行小时的平均维修人为11 h, 还不到F-4E战斗机的 $1/4$ 。在先进的F-404发动机的设计中, 已改变了传统的设

计思想,设计参数的优先顺序是:作战适用性、可靠性、维修性、全寿命期费用、性能、重量。而不是只追求性能指标。可靠性工程中的失效模式、影响及后果分析技术,已广泛用于航天、航空、电子、原子能等工业的定性和定量的可靠性分析。在F-16、F-18及“鹞”式垂直起落战斗机及DC-9、DC-10、A-300B、L-1011等大型运输机的研制中也都应用了这种技术。

§ 1-2 产品的可靠性和度量

产品的质量指标有很多种。例如,一辆摩托车的技术指标就有功率、耗油率、最大速度、航程、噪音等。这类质量指标通常称为性能指标,即产品完成规定功能所需要的指标。除此之外,产品还有另一类质量指标,即可靠性指标。它反映产品保持其性能指标的能力。如摩托车出厂时的各项性能指标经检验都符合标准,行驶十万公里后摩托车是否仍能保持出厂时各项性能指标呢?这是用户十分关心的问题。生产厂为了说明自己产品保持其性能指标的能力,就要通过试验提出产品的可靠性指标,如平均寿命、可靠度、失效率等。这两套质量指标的主要差别体现在时间上。性能指标是不涉及时间因素的,而可靠性指标是与时间(产品的使用寿命)紧密相关的。通常说的“经久耐用”就含有可靠性的意思。不过只是定性而没有定量的含义。

可靠性的定义世界各国都已统一。按我国国家标准GB3187-82《可靠性基本名词术语及定义》,可靠性定义为“产品在规定条件下和规定时间内完成规定功能的能力”。这个可靠性定义包含有五个要素:

(1)“产品”指作为单独研究和分别试验对象的任何元件、器件、设备和系统。如果对象是一个系统,则不仅包括硬件,也包括软件和人的判断及操作等因素在内。表示“可修复产品”时,它的意思就是产品失效时是可以修复的。“不可修复产品”的意思就是当产品失效时,将不能或不值得去修复。

(2)“规定时间”这是可靠性定义中的核心。因为可靠性

是与时间有关的质量指标，它是指对象的工作期限。可以用时间单位来表示，也可以用周期、次数、里程或其它单位来代替。如通常滚动轴承的工作期限用小时，车辆的工作期限用行车公里数，齿轮的寿命用应力循环次数来表示等。一般说来，产品的可靠性是随着产品使用时间的延长而逐渐降低。所以，一定的可靠性是对一定时间而言的。

(3) “规定条件” 是指产品的使用条件、维护条件、环境条件和操作技术，这些条件对产品可靠性都有直接的影响，在不同的条件下，同一产品的可靠性也不一样。所以不在规定条件下衡量可靠性就失去比较产品质量的前提。

(4) “规定功能” 通常用产品的各种性能指标来表示。产品达到规定的性能指标（有时使用一定时期后产品的性能指标允许比出厂时降低一些）或没有损坏就算完成规定功能。否则，称该产品丧失规定功能。一般把产品丧失规定功能的状态称为产品“失效”。对可修复产品通常也称“故障”。有时产品虽能工作，但不能完成规定功能；有时产品局部出故障，但尚能完成规定功能。因此在具体进行可靠性工作中，合理地、明确地给出“故障判据”或“失效判据”是很重要的。

(5) “能力” 不仅有定性的含义，在可靠性工作中还必须有定量的规定，以便说明产品可靠性的程度。这对提高产品可靠性、比较同类产品的可靠性都是重要的依据。由于产品在工作中发生故障带有偶然性，所以不能仅看一个产品的情况，而是应该在观察大量同类产品或根据一定数量的样品试验数据经统计处理之后，方能确定其可靠性的高低。所以在可靠性定义中的“能力”就具有统计学的意义。如产品在规定的条件下和规定的时间内，失效数与产品总量之比越小，其可靠性就越高；或者产品在规定的条件下，平均无故障工作时间越长，其可靠性也就越高。

可靠性要有统一的数值指标来度量它，使之在设计阶段能够预测，在试验阶段能够测定，在制造阶段能够控制，在使用阶段能够维护，使最终能够满足用户的可靠性要求。

还要说明一点：可靠性与安全性是有区别的。通常往往容易把可靠性与安全性混淆起来，把可靠认为就是安全。实际上安全性是在设计时为使产品失效不致引起人身、物质等重大损失而采取的预防措施。例如，美国L-1011大型运输机的可靠度为99.8%，指的是飞机出勤后至少有99.8%的概率完成计划飞行，机械故障不致延误起飞15min以上。并不是说安全程度只有99.8%。

度量可靠性的常用指标主要有可靠度、累积失效概率、失效率、平均寿命、可靠寿命等。

1. 可靠度 (Reliability)

产品在规定条件下和规定时间内，完成规定功能的概率称为产品的可靠度，记为 $R(t)$ 。可靠度的观测值 (Observed reliability) 对于不可修复的产品，是指直到规定的时间区间终了为止，能完成规定功能的产品数与在该时间区间开始时刻投入工作的产品数之比。

设有 N 个产品工作到 t 时刻的失效数为 $n(t)$ ，产品在此时刻的可靠度为

$$R(t) = \frac{N - n(t)}{N} \quad (1-1)$$

$R(t)$ 的取值范围在 $0 \sim 1$ 之间，即 $0 \leq R \leq 1$ 。

【例1-1】 有110台油泵，工作500h有10台失效，求 $t=500h$ 该油泵的可靠度。

解 可靠度 $R(500) = \frac{110 - 10}{110} = 0.9091$

可靠度的观测值对于可修复产品是指一个或多个产品的无故障工作时间达到或超过规定时间的次数与观察时间内无故障工作的总次数之比。

设有若干个产品在观察时间内，总计无故障的工作次数为 N ，其中无故障工作时间达到或超过规定时间 t 的次数为 n ，产品的可靠度为

$$R(t) = \frac{n}{N} \quad (1-2)$$

可靠度的允许值应根据故障的危险程度选取，航空技术中重要产品的可靠度之允许值应达到0.9999，甚至更高。但如果故障造成的损失不大，那么 $R(t)$ 的允许值可以低一些。必须注意的是，选取 $R(t)$ 值时，如果不指明产品的工作时间 t 是没有意义的。因为可靠度 $R(t)$ 是随时间增加的单调下降函数，规定时间越长，可靠度就越低。一般可采用两种方法来选取可靠度的允许值：

(1) 当产品可靠性要求很高时，应先给定可靠度的允许值 ρ ，然后按照 $R(T_\rho) = \rho$ 的关系，确定与 ρ 值相应的时间 T_ρ (T_ρ 称为可靠度为 ρ 的可靠寿命)，并用以判断产品可靠性的高低。

(2) 当产品可靠性为一般要求时(故障不会引起严重后果)，可先确定产品寿命 T ，然后直接用 $R(T)$ 值来判断产品的可靠性。

2. 累积失效概率 (Cumulative failure Probability)

定义为产品在规定的条件下和规定的时间内失效的概率。记为 $F(t)$ 。其数学式子表示为 $F(t) = P(t < T)$ 。 $F(t)$ 也可称为随机变量 t 的概率分布函数，简称分布函数。 T 为产品规定的寿命。 $F(t)$ 与 $R(t)$ 的关系为

$$F(t) = 1 - R(t) \quad (1-3)$$

3. 失效率 (Failure rate)

失效率就是工作到某时刻尚未失效的产品，在该时刻后单位时间内发生失效的概率。记为 $\lambda(t)$ 。

失效率的观测值为产品工作到某时刻 t 后单位时间内失效的产品数与工作到该时刻尚未失效的产品数之比。

设有 N 个产品，从开始工作到时刻 t 时的失效数为 $n(t)$ ，则 t 时刻的残存产品数为 $N - n(t)$ 。又若在 $(t, t + \Delta t)$ 时间区间内有 $\Delta n(t)$ 个产品失效，则时刻 t 时的失效率为

$$\lambda(t) = \frac{\Delta n(t)}{[N - n(t)] \Delta t} \quad (1-4)$$

【例1-2】 设有100个某种器件，工作五年失效4件，工作六年失效7件，求工作五年时的失效率(时间单位取年——其

符号为 a)。

$$\begin{aligned}\text{解 } \lambda_{(5)} &= \frac{\Delta n(t)}{[N - n(t)] \Delta t} = \frac{7 - 4}{[100 - 4] \times 1} = 0.0312/a \\ &= 3.12\%/a\end{aligned}$$

失效率 $\lambda(t)$ 随时间变化的规律可用失效率分布函数来表示。失效率分布函数反映产品在所有可能工作的时间区间内的失效率分布情况。

产品一般都要发生故障，而这些故障不会引起严重后果时，可用失效率来表示可靠性。

4. 平均寿命 (Mean Life)

平均寿命对不可修复的产品和可修复的产品的含义不同；对于不可修复的产品是指从开始使用到发生故障的平均工作时间，称为失效前平均工作时间，记为 MTTF (Mean time to failure)。对于可修复的产品是指一次故障到下一次故障的平均工作时间，称为平均无故障工作时间，记为 MTBF (Mean time between failure)。计算公式为

$$\bar{t} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i \quad (1-5)$$

式中 $\bar{t}$ ——平均寿命；

N ——对不可修复产品为试品数，对可修复产品为总故障次数；

t_i ——对不可修复产品为第 i 个产品失效前工作时间；对可修复产品为第 i 次故障前的无故障工作时间。

【例1-3】 设18根软轴从开始使用到发生失效的时间数据如下：16, 22, 50, 68, 100, 130, 140, 190, 210, 270, 287, 340, 410, 450, 520, 620, 800, 1100(时间单位为 h)，试求其平均寿命。

$$\begin{aligned}\text{解 } \text{MTTF} &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i = \frac{1}{18} (16 + 22 + \cdots + 800 + 1100) \\ &= \frac{5723}{18} = 318\end{aligned}$$