

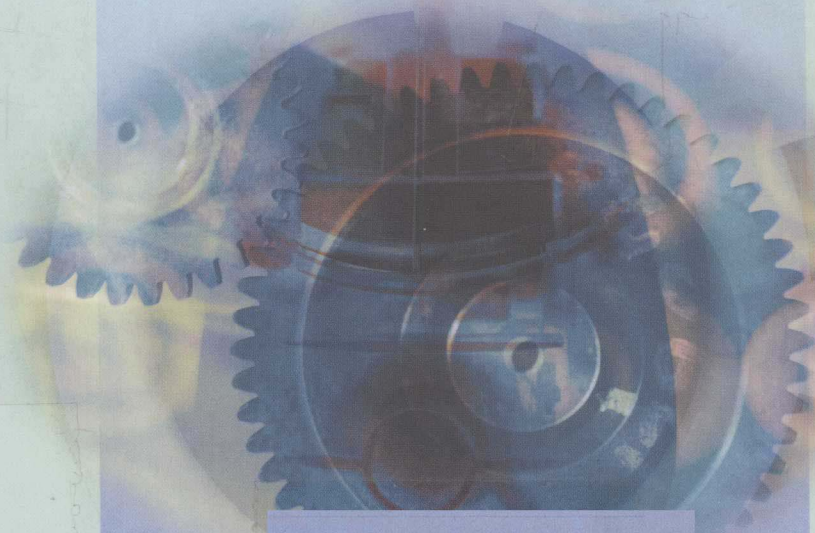


全国高等农业院校教材

全国高等农业院校教学指导委员会审定

机械故障诊断与维修

张兆国 包春江 主编



中国农业出版社

全国高等农业院校教材
全国高等农业院校教学指导委员会审定

机械故障诊断与维修

张兆国 包春江 主编

中国农业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

机械故障诊断与维修 / 张兆国, 包春江主编. —北京:
中国农业出版社, 2003.12
全国高等农业院校教材
ISBN 7-109-08745-X

I. 机... II. ①张...②包... III. ①机械-故障诊
断-高等学校-教材②机械维修-高等学校-教材
IV. TH17

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 107030 号

中国农业出版社出版
(北京市朝阳区农展馆北路2号)
(邮政编码 100026)

出版人: 傅玉祥
责任编辑 彭明喜

中国农业出版社印刷厂印刷 新华书店北京发行所发行
2004年1月第1版 2004年1月北京第1次印刷

开本: 787mm×960mm 1/16 印张: 23.25

字数: 417千字

定价: 30.40元

(凡本版图书出现印刷、装订错误, 请向出版社发行部调换)

前 言

《机械故障诊断与维修》是根据面向 21 世纪农业工程类本科专业教学内容和课程体系改革的精神而编写的。随着科学技术的迅猛发展, 各行各业的技术装备水平越来越高, 特别是资金密集、技术密集的现代化装备, 往往具有结构复杂、自动化程度高、生产率高、价格昂贵等特点。因此, 设备的停机损失越来越大, 直接或间接用于维修的费用不断上升, 机械设备的拆卸故障诊断与合理维修越来越受到重视。

目前, 还没有将故障诊断与维修有机地融合且可作为机械类本科生教材的书籍。本书的特点是将故障诊断技术与维修技术有机结合, 使学生既学习了机械故障诊断基本原理与技术, 又掌握有关现代维修技术。在教材的编写中, 我们力图做到理论联系实际, 结构合理。

参加本教材编写的人员有: 黑龙江八一农垦大学王黎明(第一章), 塔里木农垦大学王旭东、周岭(第二章), 浙江大学农业工程与食品科学学院谈黎虹(第三章), 河南农业大学史景钊(第四章), 东北农业大学张兆国(第五章), 沈阳农业大学包春江(第六章), 解放军军需大学漆东勇(第七章), 西北农林科技大学阎勤劳(第八章), 吉林农业大学袁洪印、任勇刚(第九章), 西南农业大学邱青苗(第十章)。另外, 东北农业大学纪文义负责插图处理工作, 东北农业大学于寿馨、臧宏参加了本教材部分内容的编写。全书由张兆国统稿, 东北农业大学徐德武教授审阅。

在教材的编写过程中参考了大量的文献资料, 在此对这些文献的作者、编者表示感谢。

本书可作为高等农业院校机械类专业的教材, 亦可供研究生或工科院校机械设备类专业及有关专业技术人员参考。由于作者水平有限, 书种难免有错误与不妥之处, 恳请专家与读者批评指正。

编 者

2003 年 7 月

目 录

前 言

| | |
|------------------------------|----|
| 第一章 机械零件失效理论 | 1 |
| §1.1 机械故障原因 | 1 |
| §1.2 机械的可靠性 | 4 |
| §1.3 机械的维修性..... | 10 |
| §1.4 机械零件磨损失效..... | 15 |
| §1.5 机械零件其他失效形式..... | 26 |
| 思考题 | 39 |
| 主要参考文献 | 39 |
| 第二章 机械磨损规律与维修制度 | 40 |
| §2.1 机械零件磨损规律..... | 40 |
| §2.2 机械的极限技术状态..... | 43 |
| §2.3 机械维修类别..... | 45 |
| §2.4 机械维修方式..... | 47 |
| §2.5 机械维修制度..... | 49 |
| 思考题 | 53 |
| 主要参考文献 | 54 |
| 第三章 机械故障分析法 | 55 |
| §3.1 统计分析法..... | 55 |
| §3.2 逻辑运算分析法..... | 59 |
| §3.3 故障树分析法..... | 65 |
| 思考题 | 79 |
| 主要参考文献 | 79 |

| | |
|------------------------------|-----|
| 第四章 机械故障信号处理与分析 | 80 |
| § 4.1 信号的类型及特征 | 80 |
| § 4.2 信号的幅值域分析 | 83 |
| § 4.3 信号的时差域分析 | 88 |
| § 4.4 信号的频率域分析 | 93 |
| § 4.5 信号处理的一些特殊方法 | 99 |
| 思考题 | 105 |
| 主要参考文献 | 105 |
| 第五章 机械故障诊断技术 | 106 |
| § 5.1 振动诊断技术 | 106 |
| § 5.2 无损诊断技术 | 129 |
| § 5.3 温度诊断技术 | 146 |
| § 5.4 润滑油样分析技术 | 155 |
| § 5.5 人工智能诊断技术 | 164 |
| 思考题 | 173 |
| 主要参考文献 | 173 |
| 第六章 表面工程维修技术 | 174 |
| § 6.1 表面工程维修技术的技术基础 | 174 |
| § 6.2 表面清洗技术 | 178 |
| § 6.3 维修焊接技术 | 186 |
| § 6.4 维修热喷涂技术 | 198 |
| § 6.5 电镀技术 | 204 |
| § 6.6 胶粘技术 | 212 |
| 思考题 | 218 |
| 主要参考文献 | 218 |
| 第七章 液压系统的修理 | 219 |
| § 7.1 液压系统的故障分析 | 219 |
| § 7.2 液压元件的故障诊断及维修 | 227 |
| 思考题 | 236 |
| 主要参考文献 | 236 |

| | |
|------------------------------|-----|
| 第八章 机床维修 | 237 |
| § 8.1 机床的故障诊断与排除 | 238 |
| § 8.2 机床关键部件的修理 | 242 |
| § 8.3 机床的调整 | 258 |
| 思考题..... | 263 |
| 主要参考文献..... | 263 |
| 第九章 发动机的故障诊断与排除 | 264 |
| § 9.1 汽油发动机故障诊断与排除 | 264 |
| § 9.2 柴油发动机故障诊断与排除 | 291 |
| § 9.3 发动机异响诊断 | 302 |
| § 9.4 发动机其他故障诊断与排除 | 309 |
| 思考题..... | 317 |
| 主要参考文献..... | 318 |
| 第十章 发动机修理 | 319 |
| § 10.1 发动机的解体及零件的清洗..... | 319 |
| § 10.2 发动机主要零部件的修理..... | 321 |
| § 10.3 发动机的装配、磨合与试验..... | 348 |
| 思考题..... | 360 |
| 主要参考文献..... | 361 |

第一章 机械零件失效理论

§ 1.1 机械故障原因

§ 1.1.1 故障定义

根据国家标准 (GB3187-82) 的定义: “失效是产品丧失规定的功能。对可修复产品通常也称故障。” 通常见到的发动机发动不起来、机床运转不平稳、汽车刹车失灵等现象都是机械故障的表现形式, 机械故障可以从不同角度来进行分类, 不同的分类方法反映了机械故障的不同侧面, 对机械故障进行分类的目的是为了更好地针对不同的故障形式采取相应的对策。

§ 1.1.2 故障分类

1. 按故障形成的时间规律分类

(1) 渐发性故障。渐发性故障是由于某些损伤过程的发展, 导致机械设备初始参数的劣化而造成, 故亦称磨损故障。其主要特征是, 在给定的时间段 $t_1 \sim t_2$ 内, 发生故障的概率 $F(t)$ 与产品已经工作过的时间有关, 时间越长发生故障的概率越高, 大部分机器的故障都属于这类故障, 它与零件材料的磨损、腐蚀、疲劳及蠕变等过程有密切关系。

(2) 突发性故障。突发性故障的产生是各种不利因素和偶然的外界影响共同作用的结果。这种作用已超出了机器设备所能承受的限度, 故障往往经过某一时间间隔后发生, 时间间隔是个随机变量。

突发性故障的主要特征是: 在给定的时间内, 故障率与产品已使用的时间无关, 这类故障的例子如: 因润滑油受阻中断而使轴瓦烧损、因机器使用不当或出现超负荷现象而引起零件折断, 这种故障往往突然发生, 事先并无任何征兆。

汽车轮胎发生故障失去承载能力的原因, 有可能是由于长期使用磨损,

也可能是由于突然被刺破穿孔，前者属于渐发性故障。已经磨损的旧轮胎发生故障的概率比新轮胎大很多，而轮胎被刺破穿孔属突发性故障，它与轮胎的以往使用经历完全无关，在相同时间段内考察刺破穿孔这一突发性故障的发生概率仅仅与道路的状态（外界条件）有关，对新旧轮胎都一样，可见区分渐发与突发这两类故障的依据是：故障的发生概率是否与产品的使用时间有关。

在实际中还可能存在着第三种故障，人们称之为“复合型故障”它兼有上述二类故障的特性。故障发生时间是个随机变量与产品的状态无关，而产品工作能力的耗损速度 $v(t)$ 则与产品的抗耗损性能有关。例如：由于在零件内部存在着应力集中（比如曲轴圆角不合要求），当受到外界对机器的冲击作用后，出现疲劳裂纹的根源属于突发性，随着机器的继续使用，裂纹逐渐发展属于渐发性，最后导致零件的断裂。

2. 按故障的因果关系分类 故障实质是一种不合格状态，是对其原始状态的任何一种可识别的偏离，而这种偏离对特定的使用者来说是不合格的。由于故障所处的不合格状态，可以是某一产品完全丧失了其设计功能，也可以是某种显露即将丧失功能的迹象。因此，从防止重大故障及维修角度来看，我们有必要根据其因果关系把故障进一步分为功能故障和潜在故障。

(1) 功能故障。功能故障是指一个产品不能满足规定性能标准的现象。完全丧失功能显然是功能故障，如内燃机不能发动、油泵不能供油等。但一个机件工作不能达到规定的性能水平也属于功能故障。例如，飞机刹车系统的功能如果仅仅是使飞机停住，那么它只可能有一种功能故障，即不能使飞机停住。但是刹车系统还有其他功能，例如调节停机快慢，在飞机进行地面转弯时提供差动刹车、提供防止拖胎等功能。而对这些功能则有不同的性能水平要求，当达不到规定功能水平要求时，也属功能故障。

(2) 潜在故障。功能故障一经定义，则某种能指示功能故障即将发生的实际状态往往就能鉴别出来。根据这一状态，就有可能在达到功能故障点之前把有问题的机件换掉。而这种可以被鉴别的状态即为潜在故障。因此，潜在故障是一种指示功能故障即将发生的可以鉴别的实际状态。例如，内燃机主油道压力低于某一规定数值时，即说明可能会因缺油而导致烧瓦，使内燃机发生停止运转的功能故障。由于潜在故障与功能故障之间，往往存在着某些因果关系，因此我们便可以利用潜在故障来防止功能故障的发生。可鉴别潜在故障的存在已成为现代维修理论的一个重要方面，它使机件有可能在不发生功能故障的前提下得到最大限度的利用，并成为机器技术诊断和监控的基础。

但是，并不是所有功能故障都存在与之有关的可鉴别的潜在故障，特别是

突发性故障，更无法找到可鉴别的潜在故障来事先加以预测。

3. 按故障影响后果分类 机械的故障往往由最重要的零部件和系统的工作情况所决定，有些零部件，即使发生故障，也不至于造成不允许的后果。例如，飞机在降落前，起落架发生故障，其后果将是极其严重的；如果发动机功率降低，后果只是经济损失；如果只是乘客座椅损坏，实际上就没有什么了不起的后果。为了分清主次，为维修工作的组织提供依据，就必须从其影响后果的角度对故障进行分类。如汽车制造部门为了评定汽车产品的可靠性，将故障分为致命故障、严重故障、一般故障和轻微故障四类。

§ 1.1.3 故障原因

机器故障的物理成因，可以归咎于结构因素的破坏，进而溯源于作用在这些结构上的能量因素。

1. 机械结构因素 机械故障物理成因从结构上可以归纳成下列三个方面：

(1) 连接件配合性质的破坏。这种配合性质的破坏表现在动配合件间隙的增大和静配合件的减弱。

例如，内燃机曲轴轴承及轴颈配合工作面的磨损，将使轴承间隙逐渐增大，油膜形成条件变差，并使载荷带有冲击性质，表现为主油道压力下降、出现敲击和噪音、零件温度升高等。又如，气缸与活塞环配合关系的破坏，将降低压缩系的功能；喷油泵柱塞偶件配合间隙的增大，使它失去了应有的供油功能。

连接件配合性质的破坏是机器在使用中出现故障的基本原因之一。

(2) 零件间相互位置关系的破坏。机器在使用中，由于零件的磨损或变形，导致零件本身各工作面之间或不同零件之间相互位置关系的破坏，而出现故障。

例如，拖拉机变速箱及后桥壳体在使用中变形，轴承座孔沿受力方向偏磨，造成各轴之间平行度和垂直度的破坏，从而引起噪音、振动及温度的升高，传动效率急剧下降，并且加速了零件的磨损。又如链轨式拖拉机，由于车架的变形与安装基准面磨损，破坏了发动机曲轴与变速箱第一轴的同轴度，亦将加速零件的磨损和降低传动的效率，内燃机连杆在冲击载荷作用下，发生弯曲变形，使大小端孔的轴心线不平行，将导致气缸等零件出现不正常的偏磨，破坏了应有的压缩功能。

内燃机气缸体各主轴承座孔同轴度的破坏，将使曲轴受到额外的交变负荷，继而导致曲轴的断裂，造成内燃机停止运转丧失功能。

由此可见，机器修理中，对基础件的检查和修理是一项不容忽视的内容。

(3) 机构工作协调性的破坏。机器是由若干总成组成的，整机的正常运转，需要各总成和总成中的各机构按一定的规律和关系准确无误地协调工作。在机器使用中，这种工作协调性破坏的主要原因是机构零件的磨损。但是在机器制造和维修中，即使采用技术条件符合规定要求的全新零件，如果缺乏必要的调整，仍然不能达到应有的工作协调性。

例如，对内燃机气门机构的功能要求是定时开闭气门，它和凸轮轴、传动齿轮、气门间隙调整机构之间的工作协调性有密切关系，这一协调关系的破坏将引起内燃机动力性、经济性的恶化，甚至会使内燃机失去运转的功能。

燃油系统的喷油泵，即使装上全新的合格零件，如不经过正确的油量调整、供油时间调整和调速器调整，以及向内燃机上安装的正时调整，以保证各部分工作的协调性，亦同样会使机器处于故障状态。

因此，调整工作便成为机器维修工作中的一项必不可少的内容。

2. 导致结构因素改变的能量因素 从上述结构因素可以看出，造成它们改变的主要原因是零件出现缺陷。因此，可以说零件出现缺陷是机器故障的总根源。而零件缺陷的根本原因则是能量因素的作用。

机器在使用过程中受到各种能量的作用，使零部件、机构和整机的性能发生变化继而出现故障。而这种能量来自以下几个方面：

周围介质能量的作用：包括执行任务的操作工人和维修工人的作用。

与机器运行以及各机构工作有关的内部能量：如工作中出现的热能等。

在制造或修理中，集聚在机器材料和零部件内的潜伏能量：如铸件内应力及装配、加工所造成的内应力。

由此可以看出造成机器故障的能量因素贯穿在机器制造、使用、维修的全过程。

§ 1.2 机械的可靠性

§ 1.2.1 机械产品可靠性的定义

为了使系统、机械、设备、部件或零件（以下简称产品）等尽可能少发生故障，以求满意地完成它们各自的功能，人们所采用的有关工程方法就是可靠性技术。机械产品的可靠性是指某产品在规定的条件下，在规定的时间内，无故障地完成其规定功能的能力。对该定义中所包含的几个因素说明如下：

1. **机械产品** 根据所研究的对象不同,机械产品可以是单个零件、部件、整台机械或机械系统。当所研究的产品是一个复杂的机械系统时,则应包括人的判断及操作等因素在内。

2. **规定条件** 除了规定载荷、温度、湿度、压力及介质等环境条件外,对使用方法和维护方法也必须加以规定。

3. **规定时间** 是指所研究的产品应达到的工作期限。可以用时间表示,也可以用相当于时间的指标来表示,如运转次数、运行距离和应力循环次数等。另外,还包括连续使用、间歇使用、长时间作用或短时间作用等各种时间概念的规定。

4. **规定功能** 是指产品的性能指标,如产品质量、生产效率、工作精度、载重量及功率等。当这些指标随时间的变化超过规定极限值时,机械将发生故障。因此,除了对衡量功能的指标作规定外,对产品可能发生的各种故障形式及故障判别原则都应有明确的规定。

5. **能力尺度** 在规定条件下和规定时间内,产品完成规定功能的能力有大有小。有可能出现故障,有可能不出现故障,这是“随机事件”。因此,衡量这种能力的尺度即是“概率”。

上述定义表明,采用可靠性技术,可以对产品质量做出全面的评价。对于一个高质量产品来说,除了各项性能指标均符合要求外,还包括产品随时间变化而保持自身工作能力的性能,这就是产品的可靠性指标。产品的可靠性是与时间、故障定义、故障形式等因素有关的一种综合性能。从概念上说,它包括了产品的无故障性和耐久性问题。由于产品故障与耐久性往往与一些偶然现象有关,常用随机量和随机函数来描述这些现象或过程。因此,评价产品可靠性的各项指标都具有概率性质。

可靠性问题的特点是它和机械的研制、设计、制造、试验、使用和维修等各个环节都有密切联系。每个环节都为达到所要求的可靠性目标而努力,而且在这些环节的往复循环过程中,又使产品的可靠性得到不断改进。

§ 1.2.2 机械可靠性数量指标

机械可靠性是评价产品质量的指标之一,因而需要有一些能够对可靠性加以定量表示的指标。有了可靠性的数量指标,就可以利用各种数学方法来计算和评价产品的可靠性。在可靠性技术中,把抽象的可靠性用数学形式的概率表示。衡量可靠性的概率统计指标很多,下面将介绍常用的几

个指标。

1. **可靠度 $R(t)$** 所谓可靠度就是产品在规定条件下,在规定时间内,无故障地完成其规定功能的概率,用 $R(t)$ 表示。图 1-1 为可靠度曲线。

由图 1-1 可见,产品的可靠度 $R(t)$ 是时间 t 的函数,随着时间的增长,产品的可靠度会越来越低,它是一个介于 1 与 0 之间的数,即 $0 \leq R(t) \leq 1$

2. **故障概率 $F(t)$** 相对于可靠度,即不发生故障的概率而言,那么,发生故障的概率就称之为不可靠度,又称故障概率,用 $F(t)$ 表示。图 1-2 为故障概率曲线。

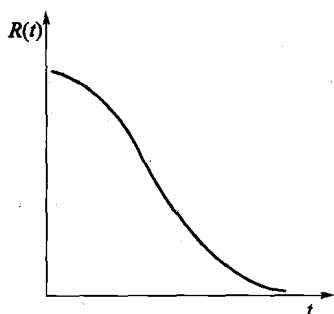


图 1-1 可靠度曲线

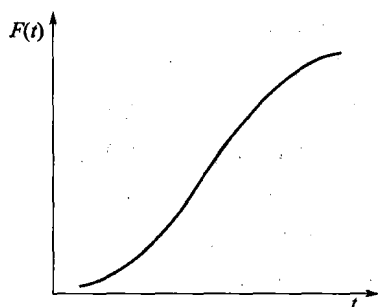


图 1-2 故障概率曲线

由图 1-2 可见,产品的故障概率 $F(t)$ 也是时间 t 的函数,随着时间的推移,产品的故障概率会越来越大,它是一个介于 0 与 1 之间的数,即 $0 \leq F(t) \leq 1$ 。

显然,产品在规定条件下,在规定时间内发生故障与不发生故障、完成规定功能与不能完成规定功能是相互对立的。因此,根据概率互补定理,则有:

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

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (1-2)$$

式 (1-1)、式 (1-2) 表明,在研究产品的可靠度 $R(t)$ 时,也可以从它的对立面——产品的故障概率 $F(t)$ 着手研究。

3. **故障概率密度函数 $f(t)$** 故障概率是一个研究产品故障规律的重要概念。为了描述产品故障分布曲线,经常要用到故障概率密度函数的概念。通常是把故障概率 $F(t)$ 的导数称为该故障概率的概率密度函数 $f(t)$, 即

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = F'(t) \quad (1-3)$$

如果根据试验和相应的理论分析,某产品的故障概率密度函数 $f(t)$ 的分布规律已知的话,便可求出该产品在 $0 \sim t$ 时间间隔的故障概率,即

$$F(t) = \int_0^t f(t)dt \quad (1-4)$$

如果某产品故障分布的概率密度函数以曲线 $f(t)$ 来表示, 那么该产品在规定时间 t 内的故障概率, 就相当在 $f(t)$ 曲线下, 在 $T \leq t$ 的区间内画影线那部分的面积, 如图 1-3 所示。

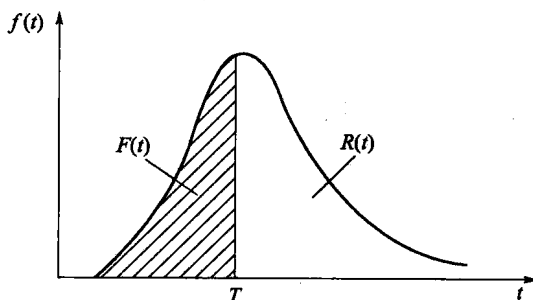


图 1-3 故障概率密度函数 $f(t)$

同理, 可推导出可靠性函数 $R(t)$ 与故障概率密度函数 $f(t)$ 之间的关系为:

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(t)dt = \int_t^{\infty} f(t)dt \quad (1-5)$$

可以看出, 在 $f(t)$ 曲线下, 在 $T > t$ 区间内的面积就相当于 $R(t)$ 。

综上所述, 可见可靠度函数 $R(t)$ 与故障概率函数 $F(t)$ 成互补关系; 而故障概率函数 $F(t)$ 与故障概率密度函数 $f(t)$ 成微积分关系。所以, 在研究产品的可靠度 $R(t)$ 时, 既可以从 $F(t)$ 着手, 也可以从 $f(t)$ 开始研究。

4. 故障率 $\lambda(t)$ 在实践中, 产品使用者所关心的是正常工作的产品到 t 时间后的单位时间内, 有多少百分比的产品会发生故障。因而也常用故障率这个概念来表征产品发生故障的程度。

把产品在 t 时刻后的单位时间内发生故障的产品数, 相对于 t 时刻还在工作的产品数的百分比值称为产品在该时刻的瞬时故障率, 习惯上称为故障率 $\lambda(t)$, 又称失效率。因此, 假定 N 个产品的可靠度为 $R(t)$, 那么产品在 t 时刻到 $t + \Delta t$ 时刻的故障产品数为:

$$NR(t) - NR(t + \Delta t) \quad (1-6)$$

又由于产品在 t 时刻正常工作的产品数为 $NR(t)$, 根据定义, 故障率可用式 (1-7) 表示:

$$\bar{\lambda}(t) = \frac{N[R(t) - R(t + \Delta t)]}{NR(t) \cdot \Delta t} \quad (1-7)$$

当 N 足够大, $\Delta t \rightarrow 0$ 时, 利用极限概念可化为求导数的形式:

$$\begin{aligned} \lambda(t) &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \bar{\lambda}(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{\Delta t} \cdot \frac{1}{R(t)} \\ &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{\Delta t} \cdot \frac{1}{R(t)} \end{aligned}$$

$$= \frac{f(t)}{R(t)} \quad (1-8)$$

或者:

$$\lambda(t) = -\frac{dR(t)}{dt} \cdot \frac{1}{R(t)} = \frac{-d \ln R(t)}{dt} \quad (1-9)$$

将该式积分, 可得:

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} = \exp\left[-\int_0^t \lambda(t) dt\right] \quad (1-10)$$

故:

$$f(t) = \lambda(t) \cdot R(t) = \lambda(t) \cdot \exp\left[-\int_0^t \lambda(t) dt\right] \quad (1-11)$$

以上讨论了有关可靠性的四个统计指标 $R(t)$ 、 $F(t)$ 、 $f(t)$ 、 $\lambda(t)$, 它们是以时间 t 为随机变量的函数来表达的。当给出了四个指标中的一个便可以推算出其他几个指标。

5. 平均寿命 T_0 在产品的寿命指标中, 最常用的是平均寿命。平均寿命是产品寿命的平均值, 是指一批产品从开始使用到发生故障的平均工作时间, 即:

$$T_0 = \frac{\text{一批产品的总工作时间}}{\text{一批产品的总数}} \quad (1-12)$$

产品开始使用后, 出现故障的时间 t 是个随机变量, 具有确定的统计规律。因此, 求平均寿命的问题实际上是求 t 这个随机变量的数学平均值。根据概率论中有关数学平均值的定义, 求连续型随机变量的数学平均值的公式是一个无穷限积分, 即:

$$T_0 = E(t) = \int_0^{\infty} t f(t) dt \quad (1-13)$$

因

$$f(t) = -\frac{dR(t)}{dt} \quad (1-14)$$

故

$$T_0 = E(t) = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (1-15)$$

对于发生故障后不能修复的产品, 由开始使用到发生故障的连续工作时间, 称故障前平均工作时间, 通常以 $MTTF$ (Mean Time to Failure) 表示。显然, 这个时间 t 可以为 $0 \rightarrow \infty$ 内的一个任意可能值。因而对某一类产品的 $MTTF$, 应理解为它们连续工作时间的数学期望 $E(t)$, 于是:

$$MTTF = E(t) = \int_0^{\infty} tf(t)dt \quad (1-16)$$

对于发生了故障，经修理或更换零件后仍能继续工作的可修复的产品，它在两次相邻故障间的平均工作时间，称平均故障间隔时间，常以 *MTBF* (Mean Time Between Failure) 表示。这个时间同样也是这类产品正常工作时间的数学期望 $E(t)$ ，它与 *MTTF* 具有相同的表达式，即：

$$MTBF = E(t) = \int_0^{\infty} tf(t)dt \quad (1-17)$$

6. 寿命方差 $D(t)$ 为了全面评定产品的可靠性，仅知道产品的平均寿命是很不够的，还必须掌握产品寿命的离散程度。在产品的寿命指标中，度量离散程度的量称为寿命方差，用 $D(t)$ 来表示。在概率统计中，可用下式表达：

$$D(t) = \sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (t - T_0)^2 f(t)dt \quad (1-18)$$

7. 可靠寿命 T_γ 当给定可靠度 $R(t) = \gamma$ 时，产品的寿命称为可靠寿命，用 T_γ 表示。在计算可靠寿命 T_γ 时，可根据故障分布函数，利用已知的方程 $R(t) = \gamma$ 来解出 T_γ ，即 $T_\gamma = R^{-1}(\gamma)$ ， R^{-1} 是 R 的反函数。

例如，对 $\lambda(t) = \lambda = \text{常数}$ 的指数分布，根据 $R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t)dt} = e^{-\lambda t} = \gamma$ 经换算可得：

$$T_\gamma = -\frac{1}{\lambda} \frac{\lg \gamma}{\lg e} = -\frac{1}{\lambda} (2.303 \lg \gamma) \quad (1-19)$$

8. 中位寿命 $T_{0.5}$ 当可靠度 $R(t) = 0.5$ 时，亦即故障概率 $F(t) = 0.5$ 时，产品的寿命称中位寿命，用 $T_{0.5}$ 表示。该定义表明，当产品工作到中位寿命时，发生故障的概率和不发生故障的概率各占一半。对于 $\lambda(t) = \lambda = \text{常数}$ 的指数分布，则：

$$T_{0.5} = -\frac{1}{\lambda} (2.303 \lg \gamma) = -\frac{1}{\lambda} (2.303 \lg 0.5) = \frac{1}{\lambda} (0.693) \quad (1-20)$$

9. 特征寿命 $T_{e^{-1}}$ 当可靠度 $R(t) = e^{-1} \approx 0.368$ 时，产品的寿命称为特征寿命，用 $T_{e^{-1}}$ 表示。对于 $\lambda(t) = \lambda = \text{常数}$ 的指数分布，则有：

$$R(t) = e^{-\lambda t}, \text{ 即 } \lambda(t) = 1$$

$$T_{e^{-1}} = \frac{1}{\lambda} \quad (1-21)$$

以上共讨论了九个可靠性基本指标，这九个指标可分为两类：前四个指

标, 即 $R(t)$ 、 $F(t)$ 、 $f(t)$ 和 $\lambda(t)$ 称为可靠性强度指标, 它们是以时间 t 为随机变量的分布函数来表达可靠性的; 后五个指标即 T_0 、 $D(t)$ 、 T_r 、 $T_{0.5}$ 和 $T_{e^{-1}}$ 称为可靠性寿命指标, 它们是用产品的寿命数值来表达可靠性的。

在故障分析中, 根据不同的场合, 需要知道不同的指标。通常可根据具体要求, 通过一定的试验来测定所需的指标。通过试验或实际运行积累的资料, 可以掌握产品的故障分布及其分布参数。这样, 便可对产品故障进行分析。

§ 1.3 机械的维修性

在可靠性技术中, 把可靠性看做是产品能正常工作的一个决定因素; 而把维修性看做是产品能恢复到正常使用状态的惟一保证。人们固然欢迎高可靠性的产品, 然而, 当产品一旦发生故障时, 人们就更关心产品的维修性。因此, 维修性也是产品的一种设计特性。

对于发生了故障后可以修复的机械产品, 从寻找并发现其故障部位起, 到进行修理、安装、调整、复原直至最后试验验证该产品已确实恢复到正常工作状态为止的全过程, 称维修。而维修性就是表示可修复产品在维修时难易程度的特性。它是产品设计时赋予产品本身的直接影响维修工作的一种固有属性, 它综合反映了维修所需工作量的大小、人员多少、费用高低、设备仪器先进程度等方面。

§ 1.3.1 维修性与可靠性的关系

可靠性反映产品是否经久耐用, 而维修性则表明产品发生故障后是否易于诊断和修复。提高可靠性就是要延长产品的正常工作时间, 而提高维修性就是要缩短产品的停修(非工作)时间。维修性的度量不仅涉及维修对象本身, 而且涉及维修人员、装备、方式、方法等条件, 因此只能在规定条件下加以度量。具有良好维修性的产品其维修所需时间短、所需设备少、所需维修人员技术级别不高且便于组织管理和采用先进的维修方式方法。

制造尽可能少发生故障的产品是可靠性技术的基本目的。但对不同的对象有不同的可靠性要求。对于一旦发生故障会造成生命财产极大危害的产品, 如宇航设备、高压容器、飞机等, 就要求有很高的可靠性, 除了保证其功能要求外, 还要满足其安全性要求, 这类产品的可靠度可超过 0.999 9。但对一般机械产品来说, 其可靠性还受其他因素的影响, 其中最主要的一点是经济性。

高可靠性产品其代价必然昂贵, 因此, 对不致发生严重故障后果的一般机