

710931

575

2704

可靠性工程与机械维修

倪文馨 编著



一九八三年

前 言

《机械零件》是论述各类通用零件、部件设计原理和计算方法的课程，而“机械零件课程设计”则是学习该课程中的大型作业，它是工科院校教学过程中理论联系实际的重要环节。其目的在于培养学生具有最基本的设计技能，为以后进行设计工作打下基础。为了有效地引导学生正确运用所学的机械设计知识，使学生在整个课程设计过程中能循序渐进地完成设计任务，本书以齿轮减速器和蜗轮减速器的设计为示例，着重讨论减速器零件各种参数之间的相互关系和选择原则，以供学习这一课程时参考。书中谬误之处，愿望读者批评指正。

本书在编写过程中，得到宋秀宁讲师和覃识贤工程师的大力协助，在此深表感谢。

编 者

一九八二年十月

可靠性工程与机械维修

目 录

前言

第一章 可靠性理论基础

- 一、可靠性基本概念..... (1)
- 二、随机事件及其概率..... (3)
- 三、随机变量及其概率分布..... (7)
- 四、可靠性基本函数..... (8)
- 五、机械设备及零件的失效类型..... (11)
- 六、机械设备及零件的寿命指标..... (13)
- 七、常用的分布函数及其数字特征..... (16)

第二章 数理统计基本知识

- 一、统计检验的意义..... (28)
- 二、参数估计..... (28)
- 三、参数的显著性检验..... (34)
- 四、分布函数的假设检验..... (38)
- 五、概率纸—图估法..... (41)
- 六、统计检验对试验数据的要求..... (47)

第三章 机械零件的耐磨寿命及其可靠性

- 一、机械零件的磨损与耐磨寿命..... (49)
- 二、机械零件的磨损量与其寿命的关系..... (49)
- 三、机械零件磨损量数据的统计分析..... (50)
- 四、机械零件的耐磨寿命及其可靠性..... (55)
- 五、金属切削刀具的磨损量与其寿命的关系..... (58)
- 六、金属切削刀具的耐磨寿命及其可靠性..... (61)

第四章 机械零件的疲劳强度、寿命及可靠性

- 一、机械零件的工作能力与失效形式..... (64)
- 二、机械零件的强度与作用应力..... (64)
- 三、关于疲劳与损伤累积的概念..... (65)
- 四、疲劳曲线: S—N曲线与P—S—N曲线..... (66)
- 五、P—S—N曲线的制作原理和方法..... (68)

六、在有限寿命条件下机械零件的疲劳寿命及其可靠度	(75)
--------------------------	------

第五章 机械零件的强度与概率设计

一、机械零件的概率设计	(86)
二、机械零件强度失效的评定准则	(87)
三、应力与强度的干涉, 零件的失效概率及可靠度	(88)
四、在有限寿命条件下零件的疲劳强度及其可靠度	(94)
五、随机变量之间的函数关系	(97)
六、随机变量函数的统计特征	(98)
七、机械零件的概率设计综合方法	(103)
八、变差系数在概率设计中的应用	(105)

第六章 机械设备的系统可靠性分析

一、系统可靠性及其基本分析方法	(109)
二、简单系统的可靠度	(109)
三、复杂系统的可靠度	(112)
四、有储备系统的可靠度	(115)
五、指数分布时的系统可靠度及其平均寿命	(116)
六、威布尔分布时的系统可靠度及其平均寿命	(120)
七、指数分布有储备系统的可靠度与平均寿命对比	(124)

第七章 机械设备的维修性与系统有效度分析

一、机械设备的维修性	(126)
二、机械设备的系统有效度	(129)
三、可修机械系统的可靠度及其平均寿命	(141)
四、串联系统及有储备系统的有效度与平均寿命对比	(146)

第八章 机械设备的使用性能与维修方式

一、概述	(149)
二、更新过程与更新理论	(149)
三、更新函数与系统有效度、平均寿命及平均修理时间	(156)
四、可修系统的失效频率、平均寿命及平均修理时间	(159)
五、机械系统的定期预防维修与定期计划维修	(165)
六、定期维修的最佳维修周期	(167)
七、最佳维修周期时的最大有效度	(174)
八、系统寿命为威布尔分布时更新函数的确定	(177)

第九章 可靠性试验与可靠性数据分析

一、可靠性试验	(180)
二、可靠性试验的计划	(181)
三、寿命试验	(182)

四、数据处理的基本步骤和要点	(183)
五、指数分布寿命试验数据的统计分析	(183)
六、威布尔分布寿命试验数据的统计分析	(193)
七、加速寿命试验	(202)
第十章 机械零件及设备系统的失效模式与故障树分析	
一、失效模式和失效机理	(209)
二、失效模式、影响与危险性分析法	(210)
三、故障树分析法	(212)
主要参考文献	

第一章 可靠性理论基础

一、可靠性基本概念

1. 可靠性与可靠性工程

可靠性并不是一个新的名词，我们对于日常用品和设备之类，习惯上时常会提出是否耐用或可不可靠等问题。但这种提法，只是对某些产品质量起到一定的定性作用，并没有给出明确的数值上的量度。

随着现代科学技术的不断发展，许多产品（包括设备和系统）所承担的工作在质的方面高级化了，它与人类的生产和生活密切相关，在量的方面更趋向复杂化了，由于彼此相关的任意一部分失效而导致整个系统发生故障的机会显著地增加了，而整个系统的故障，将会造成经济上甚至生命安全上的极大危害。这些，使得可靠性问题，受到愈来愈多的军用和民用工业部门的重视，从而把以往抽象的具有随机变量性质的可靠性，应用概率理论和数理统计方法，建立起统一的、明确的尺度即可靠度，以作为产品在设计、检测、选择、保证、管理等各个方面的科学依据。自五十年代初期以来，对可靠性技术的研究不断发展而形成了一门新兴的学科：可靠性工程学。显然，系统、设备的可靠性不是孤立存在的，可靠性的概念及技术与其他工程技术领域里先后发展起来的观念及技术，例如系统工程学、运筹学、价值工程学、安全工程学及其他生产组织管理技术等有着密切的联系，而可靠性工程学是这些科学技术的一种综合性工程技术。此外，可靠性技术本身，更贯穿于对产品的研制、设计、制造、试验、使用及维修保养等各个环节，在这些环节的循环往复过程中，使产品的可靠性得到不断地改进和提高。如图1—1所示。

2. 可靠度定义

可靠度就是对产品可靠性的概率度量。目前对可靠度一般作如下定义：产品（系统、设备和零部件等）在规定的条件下和规定的时间内完成其规定功能（无故障）的概率。

在此定义中，应明确以下四个要点：

- ①具体的对象（指系统、设备等）；
- ②所规定的功能及失效现象；
- ③规定的使用条件；
- ④规定的时间。

对于①，可靠性的反义词就是“容易发生故障”，要生产出尽可能少发生故障的产品，



图1—1 可靠性技术基本循环过程

这是可靠性技术的基本目的，但对于不同的对象，就有不同的要求。例如，对于一旦发生故障会造成生命财产极大危害的系统和设备，如宇航设备、核电站、高压容器等，就要求有很高的可靠性，除了保证其功能要求外，还要能满足其安全性要求（安全可靠度）。但一般说来，可靠性还受其他因素的影响，其中主要一点就是经济性。高可靠性产品，其代价也必然昂贵，常常是不切合实际，因此，对于有些产品，如日用设备，不如采用较低可靠性，而在使用相当一段时间之后，就更换新的。对于大多数机械产品来说，则往往需要能及时采取预防措施，进行工况监测，定期维修保养，在发生故障之后能便于排除故障，进行修理或更换零部件。因此，对于机械设备这类可修系统的可靠性要求，就会因其维修方式、维修所需时间等不同而各有不同。这里，不仅是可靠性而且维修技术尤为重要，要从开始设计和制造时就考虑到使其结构易于早期发现问题，易于进行维修，以提高产品的可修复能力即维修度。故对于一般机械产品，既有衡量其由正常工作到失效状态的可靠度 $[R(t)]$ 或平均故障间隔时间 (MTBF)，还有衡量其由故障状态通过维修能恢复到正常工作的维修度 $[M(t)]$ 或平均修复时间 (MTTR)，图1—2表示它们之间的相互转移关系。

可见，对于一般机械产品来说，并不一定要求有很高的可靠度，但需要有尽可能高的、反映出可靠度与维修度二者结合在一起的有效度（可利用性）。用这种有效度可以表示出在某种维修条件下，可修系统、设备或零部件等在给定的时间内能保持其功能处于正常状态的概率，在稳定状态下，产品的有效度可保持为：

$$A(\infty) = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

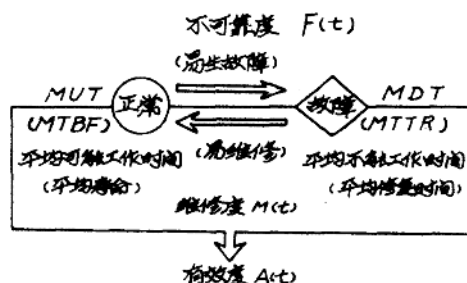


图1—2 可靠度、维修度及有效度之间的关系

对于②：所谓规定的功能就是指在一定的使用条件下，能维持正常工作而不发生故障（或失效）。在产品的功能中，有总功能和分功能，有主要功能和次要功能，因而不同的故障对它们所引起的损害也不同。此外，在故障中，有易于排除的和难于排除的，有突然发生以致完全损坏的致命失效，也有因功能逐渐减退而产生的耗损失效，还有偶然性的或间歇性不稳定失效以及人为失误引起的失效等。所以对于失效不仅要考虑其发生次数，而且还要考虑其本质，如进行失效模式及其影响分析等。

对于③：是指机械系统、设备及零部件在工作时所处的环境条件、运行条件及维修条件等。例如，载荷是否有冲击或振动，环境条件是否恶劣，是否受温度或压力变化的影响等。使用者及维修人员的技术水平以及组织管理工作是否恰当等也包括在内。

对于④：所谓规定的时间就是指产品要达到一定的工作期限即使用寿命，它是表达产品可靠性的一个基本因素。显然，任何一种机械设备或零件，如果长期使用下去是必然要失效的，也就是说其失效概率为1，其可靠度为零。因此，产品的可靠性总是与一定的使用时间（寿命）相联系的，这点在概念上不同于一般的质量检验。可靠性与时间的函数关系式称为可靠度函数，常用符号 $R(t)$ 表示，其中 t 为时间（小时），但也可以用其他量纲，如汽车、船舶等交通工具用行驶里程，机械零件的疲劳寿命用循环次数等。

二、随机事件及其概率

1. 随机事件

在研究、设计、生产或使用中出现的一定现象、状态、实验结果等，它们在一次观察、试验中可能出现也可能不出现，但在大量重复试验中却具有某种规律性，这就称之为随机事件。例如，某批轴承的寿命超过5000小时是一个随机事件。其中，在一定条件下必然会发生的事件，称为必然事件。例如，机械设备的使用寿命是有限的，是必然事件；而在一定条件下不可能发生的事件，称为不可能事件，如“永动机”就是不可能事件；这两种都是随机事件的特殊情况。

2. 频率与概率

设某随机事件A在n次重复试验中出现了m次，我们称比值 $f_n(A) = m/n$ 为A出现的频率，m为频数。显然 $0 \leq m \leq n$ ，如果n充分大，频率 $f_n(A)$ 就稳定在某个常数 $P(A)$ 的周围，即有： $f_n(A) \approx P(A)$ ，这时称 $P(A)$ 为A的概率。在工程实践中，我们通常就是这样通过频率来找出客观存在的概率。

根据频率的性质，可知概率 $P(A)$ 的数值必定在0与1之间，即：

$$0 \leq P(A) \leq 1 \quad (1.1)$$

又若事件A与事件B二者之中必然有一个发生，且仅有一个发生，例如，产品的合格与不合格，机械设备完成规定功能的成功与失效，二者必居其一而旁无其他状态，则其全部概率之和为1，即：

$$P_i + P_f = 1 \quad (1.2)$$

式中： P_i 为合格或成功概率； P_f 为不合格或失效概率。

(1.1) 和 (1.2) 式为概率定义中两个最基本条件。

3. 随机事件之间的关系

现在来讨论两个或多个事件之间的关系。需要说明的是所谓多个事件A、B、C、……指的都是同一个随机试验的事件，按集合论概念，它们都是同一个基本事件空间S的子集，即属于同一个样本空间。

(1) 包含与相等 如果事件A发生时，事件B也一定发生，则称B包含A或A含于B中，记作：

$$B \supset A \text{ 或 } A \subset B \quad (1.3)$$

例如： $(A = \text{某批零件的平均寿命为1200小时}) \subset (B = \text{某批零件的平均寿命不超过1000小时})$ 。

如果 $A \subset B$ 、 $B \subset A$ ，则称A、B两事件相等，记作：

$$A = B \quad (1.4)$$

(2) 事件的和 A、B中至少有一个出现，这一事件称为事件A、B的和，记作：

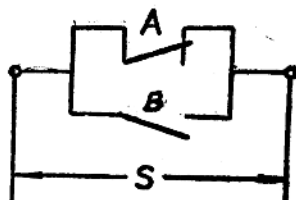
$$A \vee B \text{ (或 } A + B) ** \quad (1.5)$$

** 插图中以“U”表示“和”，以“∩”表示“积”

类似的多个事件的和为:

$$A \vee B \vee C \vee \dots \quad (1.6)$$

图1—3所示为一种并联结构系统,其信号导通或无故障工作事件S就应满足: $S = A \vee B$, 也就是,两个开关闭合事件A和B中至少要有一个出现;即事件S为事件A、B的和。



$$S = A \vee B$$

图1—3 事件的和

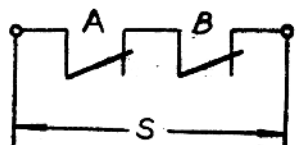
(3) 事件的积 A与B同时出现,这一事件称为事件A、B的积,记作:

$$A \wedge B \text{ (或 } AB) \quad (1.7)$$

类似的多个事件的积为

$$A \wedge B \wedge C \wedge \dots \quad (1.8)$$

图1—4所示为一种串联结构系统,其信号导通或无故障工作事件S就应满足: $S = A \wedge B$, 即两个开关闭合事件A和B要同时出现。



$$S = A \wedge B$$

图1—4 事件的积

(4) 事件的互斥 如果A与B不可能同时出现,也就是A、B的积是不可能事件,即 $AB = \phi$, 就称A与B是互斥的(或互不相容的)。例如材料的韧性 with 硬度是互斥的。

(5) 事件的互逆 如果A与B互斥,但A与B中必然有一个发生,且仅有一个发生,亦即:

$$\left. \begin{aligned} A \wedge B &= \phi = \text{不可能事件} \\ A \vee B &= S = \text{必然事件} \end{aligned} \right\} \quad (1.9)$$

则称A与B是互逆,或称A是B(或B是A)的对立事件,记作:

$$A = \bar{B} \quad (B = \bar{A}) \quad (1.10)$$

或

$$A + \bar{A} = S \quad (1.11)$$

例1—1 如图1—5所示为一种串并联结构系统,试求信号导通或无故障工作事件S与其三个开关闭合事件A、B、C之间的关系。

解: 信号导通事件 $S = (A \wedge B) \vee (A \wedge C) = AB + AC$

但也可以是: $S = A \wedge (B \vee C) = A(B + C)$

因此: $S = A(B + C) = AB + AC \quad (1.12)$

(1.12) 式为布尔代数运算法分配律的一种形式,它与普通代数运算法相符,即 $a(b + c) = ab + ac$, 但还有一种分配律可为(证略):

$$S = A \vee (B \wedge C) = (A \vee B)(A \vee C)$$

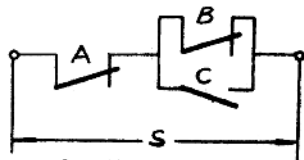
即

$$S = A + BC = (A + B)(A + C) \quad (1.13)$$

这与一般代数运算法不同,因为 $a + bc \neq (a + b)(a + c)$ 。

4. 事件和的概率——加法定理

(1) 若事件A和事件B是互斥的,则出现A或出现B这一事件和的概率如图1—6(a)



$$S = (A \wedge B) \vee (A \wedge C) \\ = A \wedge (B \vee C)$$

图1—5 串、并联系统

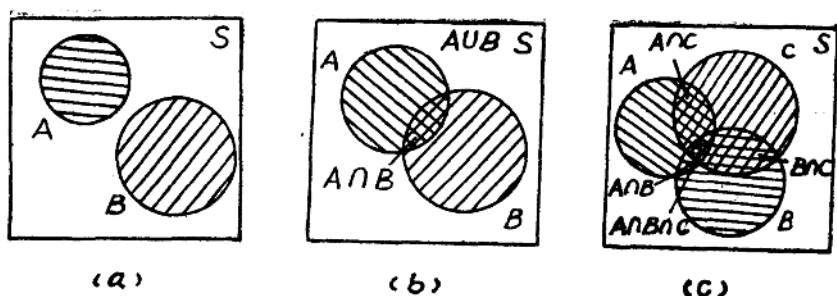


图1-6 事件和的概率

所示为:

$$P(A \cup B) = \frac{S_A}{S} + \frac{S_B}{S} = P(A) + P(B) \quad (1.14)$$

式中: S_A 为 A 所占区域, S_B 为 B 所占区域, S 为全部 (样本空间) 区域。

因此, 对于两两互不相容的 n 个事件 $A_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 有:

$$P(A_1 \cup A_2 \cup \dots \cup A_n) = P(A_1) + P(A_2) + \dots + P(A_n) = \sum_{i=1}^n P(A_i) \quad (1.15)$$

(1.15) 式为加法定理的一般表达式。

对于对立事件, 由 (1.11) 式得:

$$P(A \cup \bar{A}) = P(A) + P(\bar{A}) = 1 \quad (1.16)$$

(2) 若事件 A 和事件 B 是相容的 (不是互斥的), 则出现 A 或出现 B 或同时出现 A、B 这一事件和的概率如图 1-6(b) 所示为:

$$P(A \cup B) = \frac{S_A}{S} + \frac{S_B}{S} - \frac{S_{A \cap B}}{S} = P(A) + P(B) - P(A \cap B) \quad (1.17)$$

式中: $P(A \cap B)$ 为事件 A、B 同时出现的概率, 如果它们既相容, 又不互相影响, 则 $P(A \cap B) = P(A) \cdot P(B)$ 。

可见, 仅只有在 $P(A \cap B) = 0$ 的条件下, 两事件 A、B 才是互斥的。

对于三个两两相容事件, 如图 1-6(c) 所示, 同理为:

$$P(A \cup B \cup C)$$

$$= P(A) + P(B) + P(C) - P(A \cap B) - P(B \cap C) - P(C \cap A) + P(A \cap B \cap C) \quad (1.18)$$

也可以推广到 n 个事件 $A_i (i = 1, 2, \dots, n)$, 有:

$$P(A_1 \cup A_2 \cup \dots \cup A_n) = \sum_{i=1}^n P(A_i) - \sum_{i < j=2}^n P(A_i A_j) + \sum_{i < j < k=3}^n P(A_i A_j A_k) + \dots + (-1)^{n-1} P(A_1 A_2 \dots A_n) \quad (1.19)$$

(3) 若事件 A 包含事件 B, 即 $A \supset B$ 时, 则

$$P(A \cup B) = P(A) \quad (1.20)$$

5. 事件积的概率——条件概率和乘法定理

两相容事件 A、B 同时出现的概率相对于 S 而言, 按图 1-7 为:

$$P(A \cap B) = \frac{S_{A \cap B}}{S} \quad (1.21)$$

式中, $S_{A \cap B}$ 为 A、B 两部分的重合区域, S 为全部样本空间区域。

但还经常遇到的一些情况是: A 的发生受到 B 的影响, 或者相反, 例如要求在事件 B 已经发生的情况下确定事件 A 发生的概率, 即 A 的条件概率。

将 (1.21) 式改写:

$$P(A \cap B) = \frac{S_B}{S} \cdot \frac{S_{A \cap B}}{S_B} \quad (1.22)$$

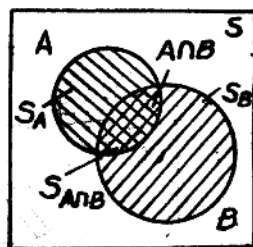


图1-7 事件积的概率

式中: $\frac{S_B}{S} = P(B)$ 为事件 B 发生的概率。

令 $\frac{S_{A \cap B}}{S_B} = \frac{P(A \cap B)}{P(B)} = P(A/B)$ 为事件 A 的条件概率, 则:

$$P(A \cap B) = P(B) \cdot P(A/B) \quad (1.23)$$

$$\text{同理: } P(A \cap B) = P(A) \cdot P(B/A) \quad (1.24)$$

$$\text{即 } P(A \cap B) = P(A) \cdot P(B/A) = P(B) \cdot P(A/B) \quad (1.25)$$

这就是说, A 的发生对随后 B 发生的概率, 或者 B 的发生对随后 A 发生的概率是有影响的。

如果 A 与 B 间不存在这种影响, 则 $P(A/B) = P(A)$, $P(B/A) = P(B)$ 。这时, 由 (1.25)

式得:

$$P(A \cap B) = P(A) \cdot P(B) \quad (1.26)$$

当而且仅当 (1.26) 式成立时, 我们称事件 A 与 B 是相互独立的。

又若事件 A 包含事件 B, 即 $A \supset B$ 时, 则

$$P(A \cap B) = P(B) \quad (1.27)$$

乘法定理可以推广应用于三个或三个以上的事件。例如, 对于 A、B、C 三个相容事件有:

$$P(A \cap B \cap C) = P[(A \cap B) \cap C] = P(A \cap B) \cdot P[C/(A \cap B)]$$

$$\text{但 } P(A \cap B) = P(A) \cdot P(B/A)$$

$$\text{故 } P(A \cap B \cap C) = P(A) \cdot P(B/A) \cdot P[C/(A \cap B)] \quad (1.28)$$

因此, 当而且仅当在以下条件时, A、B、C 才为相互独立事件:

$$\left. \begin{aligned} \text{① } & P(A \cap B) = P(A) \cdot P(B), \\ & P(A \cap C) = P(A) \cdot P(C), \\ & P(B \cap C) = P(B) \cdot P(C), \end{aligned} \right\} \quad (1.29)$$

$$\text{及 ② } P(A \cap B \cap C) = P(A)P(B)P(C)$$

例1-2 根据统计资料, 已知某种机器的使用寿命达10年的概率为80%, 达15年的概率为40%, 问现在已用到10年的这种机器能继续用到15年的概率为多少?

解: 设 A 表示机器能使用到10年的事件, 其概率 $P(A) = 0.8$; B 表示机器能使用到15年的事件, 其概率 $P(B) = 0.4$ 。

已用了10年的机器能继续用到15年的概率为:

$$P(B/A) = \frac{P(A \cap B)}{P(A)}$$

因 $A \supset B$, $A \cap B = B$, 即 $P(A \cap B) = P(B)$,

故
$$P(B/A) = \frac{P(B)}{P(A)} = \frac{0.4}{0.8} = 0.5$$

对于相容的独立事件, 其加法定理也可以用与其对应的对立事件的乘法定理来处理; 这个关系我们在以后研究机械设备及系统可靠度时会经常用到, 称为狄·摩根 (De Morgan) 法则: 凡事件的和与事件的积取补后均可互换。即:

$$(\overline{A \vee B}) = 1 - A \vee B = \overline{A} \wedge \overline{B}, \quad (1.30)$$

及
$$(\overline{A \wedge B}) = 1 - A \wedge B = \overline{A} \vee \overline{B}, \quad (1.31)$$

三、随机变量及其概率分布

1. 随机变量

如果把所要观察或进行试验的各个随机事件各用一个数来表示, 这些数显然是随机事件的函数, 记作 X ; 相应于一次试验结果, X 取某一个数值 x , 多次试验结果就有若干个不同的 x 值, 所以 X 是一个随机变量。随机变量取某个数值的概率, 就是这个数值所对应的随机事件的概率。

设总共进行了 n 次互相独立的试验, 所得到随机变量 X 的 n 个随机数值为 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 这些随机数值的集合 (即一组试验数据) 称为随机变量 X 的样本, n 是它的容量, 其大小由重复观测的次数来确定。

各种物理量、工程实践中观测值以及机械设计中大多数设计参数, 如载荷、强度、几何尺寸等都是随机变量; 其中有只能取可数个数值的离散型随机变量, 也有可能取值布满某个区间的连续型随机变量。

2. 随机变量的概率分布

只用一个单独的数值, 显然不能代表一个随机变量, 而前者也就是我们一般在常规设计中将设计参数作为确定性变量所经常采用的。要完整地掌握一个随机变量, 就必须了解它取各种可能值的概率, 以及它的概率分布。

随机变量 X 的概率分布, 可以用分布函数 $F(x)$ 来表示。分布函数在 x 处的值, 等于随机变量 X 取值小于或等于 x 这样一个随机事件的概率:

$$F(x) = P(X \leq x) \quad (1.32)$$

显然, 任何一个分布函数都必须满足:

$$F(x = -\infty) = 0, \quad F(x = \infty) = 1 \quad (1.33)$$

对于离散型随机变量 X , 它只能取可数的数值 $x (x = x_1, x_2, \dots)$, 除了分布函数外, 还可以用概率函数 $f(x)$ 来表示它的概率分布。概率函数在某一点 x 处的值, 等于随机变量 X 取值 x 的概率, 即:

$$f(x) = P(X = x) \quad (1.34)$$

因此, 分布函数与概率函数之间存在如下关系:

§ 2—2 选择减速器的传动方案

一、减速器传动方案的比较

齿轮减速器根据齿轮形状的不同,可分为圆柱齿轮减速器、圆锥齿轮减速器和圆锥——圆柱齿轮减速器。根据传动级数的不同,可分为单级、两级和多级减速器。根据传动轴布置形式的不同,可分为展开式、分流式和同轴线式减速器。

图2—3是两种输入轴和输出轴布置形式不同的单级圆柱齿轮减速器。其齿轮可以是直齿、斜齿或人字齿。壳体通常都用铸铁制造。轴承多采用滚动轴承,仅在重型减速器中采用滑动轴承。这种减速器最大的优点是结构简单,零件数量少,缺点是传动比较小。当传动比稍大时,减速器的外形尺寸便显得庞大,重量也太重,消耗金属量多。所以一般只适用于传动比小于8~10的范围。

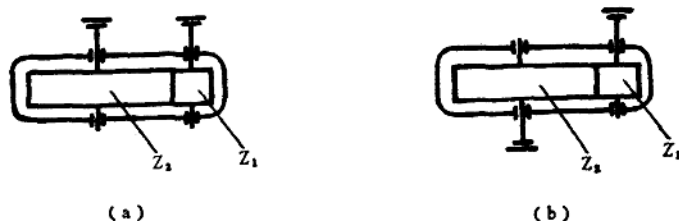


图2—3

图2—4、图2—5、图2—6都是两级圆柱齿轮减速器,适用于总传动比在8~60之间。图2—4是两级减速器中最简单的一种,称为展开式传动装置。它的结构简单,零件数量少。但齿轮相对于轴承的布置不对称,齿面载荷分布不均匀,对于齿轮的正确啮合很不利。因此,为了改善载荷的分布,轴应该设计得具有较大的刚度,而且应把高速级齿轮布置在远离扭矩输入端。这种减速器一般只宜用于载荷较平稳的传动中。为了改善传动的平稳性,高速级常做成斜齿圆柱齿轮。

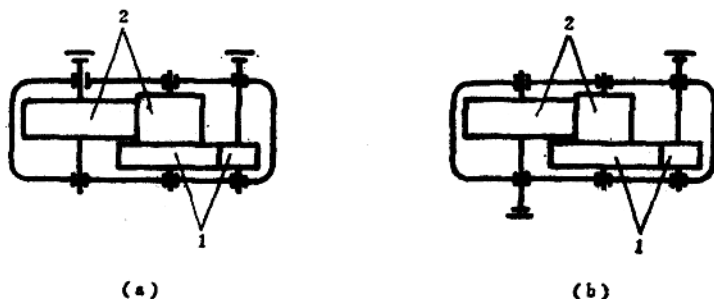


图2—4

1. 高速级齿轮 2. 低速级齿轮

表1-1 零件疲劳试验数据

顺序号	区 间 距 Δt (小时)	区间中值 t_i (小时)	失效数 ΔN_{fi}	累积失效数 N_{fi}	正常工作数 N_{fi}	失效频率 f_i (%)	累积失效频率 $F_i = \sum_{j=1}^i f_j$
1	0~100	50	4	4	86	4.44	4.44
2	100~200	150	21	25	65	23.34	27.78
3	200~300	250	30	55	35	33.33	61.11
4	300~400	350	25	80	10	27.78	88.89
5	400~500	450	8	88	2	8.89	97.80
6	500~600	550	2	90	0	2.22	100.00

例如, 根据表1-1所列的测定数据, 在 $t_4 = 400$ 小时时, 其累积失效频率为:

$$F_{(400)} = \sum_{i=1}^4 f_i = 0.0444 + 0.2334 + 0.3333 + 0.2778 = 0.8889 = 88.89\%$$

或

$$F_{(400)} = \frac{N_{fi}}{N} = \frac{80}{90} = 0.8889 = 88.89\%$$

同理, 零件在 t_i 时间内的可靠度为:

$$R_i = \frac{N_{si}}{N} = \frac{N - N_{fi}}{N} = 1 - \frac{N_{fi}}{N} = 1 - F_i \quad (1.46)$$

例如, 在 $t_4 = 400$ 小时时的可靠度为:

$$R_{(400)} = 1 - F_{(400)} = 1 - 0.8889 = 0.1111 = 11.11\%$$

由 (1.46) 式也得证, 要研究机械设备及零件的可靠度, 一般从它的对立面即累积失效频率 (失效概率) 来着手。

3. 失效概率密度函数

以上所举例子, 是用频率来衡量失效概率, 从方法上说比较简单容易掌握, 但它有一定的局限性, 会随机上下波动, 但如果我们将抽样数目不断增加, 区间距不断缩小, 则如图1-9所示的频率分布图中的小长方形顶边的折线, 将逐渐趋近于一条用实线所表示的光滑曲线, 这就是 $N \rightarrow \infty, \Delta t \rightarrow 0$ 的极限情况。这时, 频率分布图就可接近于概率密度曲线。

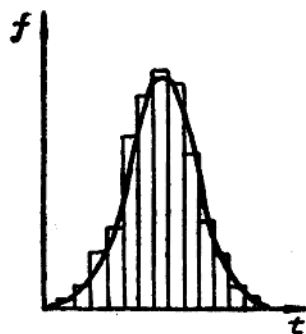


图1-9 频率分布图

在这种情况下, 设一批零件到 t 时刻时的失效数为 $N_f(t)$, 到 $t + \Delta t$ 时的失效数为 $N_f(t + \Delta t)$, 即在单位时间 Δt 内的失效数为 $\Delta N_f(t) = N_f(t + \Delta t) - N_f(t)$, 则按概率密度函数的定义:

$$f(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta N_f(t)}{N \cdot \Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{\Delta t} = \frac{dF(t)}{dt} \quad (1.47)$$

而失效概率 (分布函数) $F(t)$ 按 (1.39) 式为:

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt \quad (1.48)$$

这样, 如果密度函数 $f(t)$ 为已知, 则即可根据 (1.48) 式估计出在任意时刻 t 时的累积失效概率, 后者在分布密度函数曲线图 1—10 中, 相当于在 $f(t)$ 曲线下面阴影线那部分的面积。

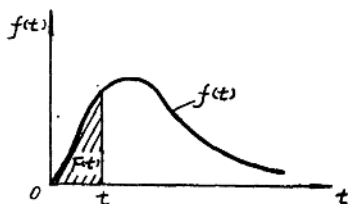


图1—10 分布密度函数

同理, 可推导出可靠度函数 $R(t)$ 与密度函数 $f(t)$ 之间的关系为:

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt = \int_t^{\infty} f(t) dt \quad (1.49)$$

或

$$f(t) = -\frac{dR(t)}{dt} \quad (1.50)$$

4. 失效率

失效率为可靠性技术中的一个重要函数, 也有称之为故障率或故障强度, 它是判别机械设备或零件失效规律的基本参数。

设一批零件到时刻 t 仍能继续正常工作的数目为 $N_s(t)$, 而它们在下一段 Δt 时间内出现的故障数为 $\Delta N_f(t)$, 则这批零件的平均失效率为:

$$\begin{aligned} \bar{\lambda}(t) &= \frac{\Delta N_f(t)}{N_s(t) \Delta t} = \frac{\Delta N_f(t)}{[N - N_f(t)] \Delta t} \\ &= \frac{\Delta N_f(t)}{N \Delta t} \cdot \frac{1}{1 - \frac{N_f(t)}{N}} = \bar{f}(t) \frac{1}{1 - F(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} \end{aligned} \quad (1.51)$$

取 $\Delta t \rightarrow 0$ 极限情况, 得瞬时失效率 $\lambda(t)$ 为:

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \bar{\lambda}(t) = f(t) \frac{1}{1 - F(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (1.52)$$

由此可见, 失效率 $\lambda(t)$ 是反映一批零件已正常工作到 t 时刻的条件下, 在下一段 Δt 时间内将发生的失效倾向 (强度)。故也可按条件概率定义, 推导得 (1.52) 式:

$$\begin{aligned} \lambda(t) &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P[(t < t_x \leq t + \Delta t) \wedge (t_x > t)]}{\Delta t P(t_x > t)} \\ &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t < t_x \leq t + \Delta t)}{\Delta t} \cdot \frac{1}{P(t_x > t)} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{\Delta t} \cdot \frac{1}{1 - F(t)} \\ &= \frac{dF(t)}{dt} \cdot \frac{1}{R(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} \end{aligned}$$

(1.52) 式为失效率与失效密度及可靠度三者之间的关系式。通常通过实验或现场测定 $\lambda(t)$ 之后, 即可求出 $f(t)$ 以及 $F(t)$ 和 $R(t)$ 。

以 (1.50) 式代入 (1.52) 式得:

$$\lambda(t) = \frac{-dR(t)}{R(t) dt} = -\frac{d \ln R(t)}{dt} \quad (1.53)$$

$$\text{将上式积分, } R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \quad (1.54)$$

$$\text{故 } f(t) = \lambda(t) R(t) = \lambda(t) e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \quad (1.55)$$

例如, 在各种分布函数类型中最简单的一种是指数分布, 其 $\lambda(t) = \lambda = \text{常数}$, 代入 (1.55) 式, 得其概率密度函数为:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (1.56)$$

可靠度为:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (1.57)$$

可靠性函数 $R(t)$ 、 $F(t)$ 、 $f(t)$ 和 $\lambda(t)$ 之间的相互关系如表1—2所列。

表1—2 可靠性函数之间的关系式

	$R(t)$	$F(t)$	$f(t)$	$\lambda(t)$
$R(t)$	$R(t)$	$1 - F(t)$	$\int_t^\infty f(t) dt$	$e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}$
$F(t)$	$1 - R(t)$	$F(t)$	$\int_0^t f(t) dt$	$1 - e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}$
$f(t)$	$-\frac{dR(t)}{dt}$	$\frac{dF(t)}{dt}$	$f(t)$	$\lambda(t) e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}$
$\lambda(t)$	$-\frac{1}{R(t)} \frac{dR(t)}{dt}$	$\frac{1}{1-F(t)} \frac{dF(t)}{dt}$	$\frac{f(t)}{\int_t^\infty f(t) dt}$	$\lambda(t)$

五、机械设备及零件的失效类型

一般机械零件和材料的失效规律, 按其失效率函数曲线形式多数属于如图1—11中所示的三种基本类型中的一种。

1. 第一种类型——失效率恒定型

如图1—11(B)所示, 失效率 $\lambda(t) = \lambda = \text{常数}$, 称为失效率恒定型 (CFR), 其可靠度函数 $R(t) = e^{-\lambda t}$, 呈最简单的指数分布, 是可靠度函数的最基本形式。对于这种类型, 其故障的发生是随机性的, 即没有一种特定的失效机理在起主导作用, 而大多数是由于使用不当, 操作上疏忽或润滑密封及类似维护条件不良等偶然原因所引起。

2. 第二种类型——失效率减小型

如图1—11(A)所示。失效率 $\lambda(t)$ 随时间单调降低, 称为失效率减小型 (DFR), 零件在开始时失效率高, 其后逐渐降低, 这反映出一般零件的早期失效过程。其原因在于材料、结构、制造工艺上存在有某些缺陷。一般受静载荷作用或有少量摩擦磨损零件的失效, 基本上是属于这种类型。

3. 第三种类型——失效率增加型

如图1—11(C)所示。失效率 $\lambda(t)$ 随着时间的增加而升高, 称为失效率增加型 (IFR), 这说明零件经过一段比较稳定的运行之后到达损耗老化阶段, 其失效率随着时间的增加而不断升高, 最后出现大量失效。大多数受变载荷作用及易磨损零件的失效是属于这种类型, 其

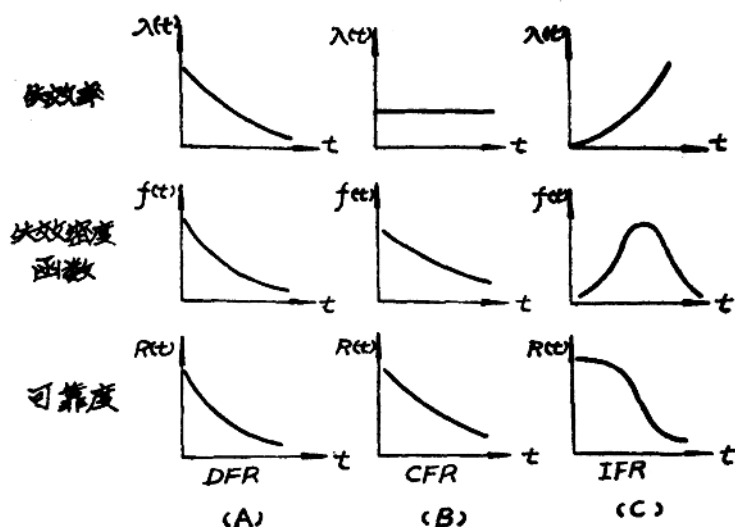


图1-11 失效率、失效密度与可靠度函数曲线
(A)—早期失效过程；(B)—恒定失效过程；(C)—耗损失效过程

失效密度函数 $f(t)$ ，如图1-11(C)所示多半是近似正态分布。

4. 机械设备的失效率曲线

由多数零件构成的机械设备，其失效率函数曲线如图1-12所示的浴盆形状，常称浴盆曲线，它分成三个阶段。

第一阶段为早期失效期(A)。设备在开始工作时失效率高，但随着工作时间的增加而逐渐降低，这是由于设备中有些寿命短的零件和设计上的疏忽、生产工艺及装备质量欠佳等原因所引起。在一定条件下通过老炼、跑合、调整等措施，可以使失效率减小而趋于稳定。

第二阶段为偶然失效期(B)。这个时期设备的失效率基本上稳定，相当于图1-11(B)的失效率恒定型。在这个期间，设备的失效率最低，是处于最佳工作状态。这段时间的长短，也就反映出设备有效寿命的长短，因此，要采取各种措施来保持设备在这段时期的正常运行，延长其有效使用寿命。

第三阶段为耗损失效期(C)。这一时期的失效率再度上升，相当于图1-11(C)的失效率增加型。在这个时期，设备中的某些零件已经老化耗损，寿命衰竭，失效率不断上升。它们的失效分布规律，多数近似正态分布和威布尔分布。通过可靠性预测，可以事先估计出这些零件疲劳耗损的开始时间，及时地予以修复或更换，这样，能使已经趋向上升的失效率又降下来，延长这些可维护的设备的有效寿命。

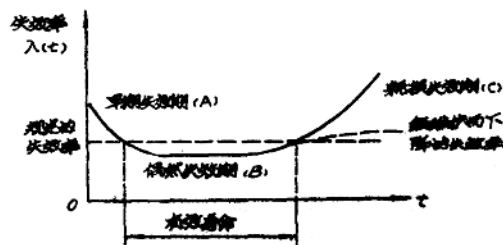


图1-12 机械设备的失效率曲线