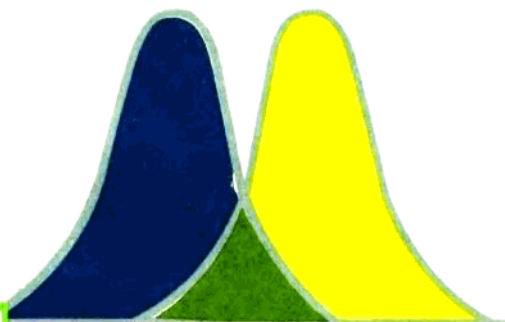


吴兆汉 蔡 坪 陈深龙 编著

NEIRANJI 内燃机
KEKAOXING 可靠性
SHEJI 设计



北京理工大学出版社

内 容 简 介

本书介绍了内燃机的可靠性基本概念及其可靠性设计的基础知识、基本原理与方法。本书可作为内燃机专业的有关教材，也可供内燃机专业的设计、生产和维修使用人员参考。

内 燃 机 可 靠 性 设 计

吴先议 蔡 珏 陈深龙 编著

北京理工大学出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经销

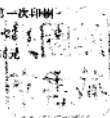
北京密云华都印刷厂印装

787×1092毫米 32开本 12印张 265千字

1988年12月第一版 1988年12月第一次印刷

ISBN 7-81013-152-4/TH·4

印数：1—2300册 定价：2.55元



前 言

本书是内燃机专业本科生的选修课教材，同时也可作为研究生的教学参考书，并可供内燃机设计、研究、生产和使用等部门的技术人员参考。

本书主要介绍有关内燃机可靠性的基本概念以及与内燃机可靠性设计有关的基础知识、基本原理与方法。在论述中结合内燃机设计特点，介绍有关实例，并且在最后较系统地、全面地介绍近代内燃机可靠性指标、内燃机主要零件的故障模式与机理以及提高内燃机可靠性的途径。

本书由吴兆汉主编。第一、六、七章由吴兆汉编写；第三、四章由蔡祥编写；第二、五章由陈深龙编写。全书由汪长民审阅。

由于编者的水平有限，编写时间又较短促，对本书存在的问题，欢迎读者批评指正。

编者

1988年1月于北京理工大学

目 录

第一章 可靠性的基本概念

第一节 引言	(1)
第二节 可靠性与可靠性的度量	(2)
第三节 可靠度函数与故障率曲线	(21)
第四节 系统可靠性	(29)
第五节 可靠度的分配	(51)
第六节 可靠性的增长与退化	(60)
第七节 固有可靠性与使用可靠性	(61)
第八节 可靠性管理	(64)

第二章 可靠性的概率分布

第一节 引言	(73)
第二节 指数分布	(74)
第三节 正态分布	(78)
第四节 对数正态分布	(84)
第五节 威布尔分布	(89)
第六节 伽玛分布	(95)
第七节 概率纸的使用	(100)

第三章 强度可靠性设计基本理论

第一节 引言	(123)
第二节 随机设计变量的分布参数	(126)
第三节 几何尺寸的分布参数	(138)
第四节 材料机械性能的分布参数	(141)
第五节 载荷分布参数	(146)
第六节 应力与变形的分布参数	(160)

第七节	应力-强度干涉理论与可靠度计算	(178)
第八节	安全系数与可靠度	(186)
第九节	可靠度的置信水平	(193)
第四章	零件强度概率设计	
第一节	引言	(201)
第二节	承受拉、压载荷零件的静强度概率设计	(201)
第三节	承受弯、扭载荷零件的静强度概率设计	(207)
第四节	承受复合载荷零件的静强度概率设计	(214)
第五节	疲劳强度的概率设计	(218)
第五章	可靠性的预测、试验与检验	
第一节	引言	(231)
第二节	可靠性预测	(232)
第三节	可靠性试验	(270)
第四节	可靠性检验	(282)
第六章	制造、使用维修与可靠性	
第一节	引言	(294)
第二节	制造与可靠性	(295)
第三节	使用维修与可靠性	(301)
第四节	维修性设计	(304)
第五节	故障分析与故障维修	(310)
第六节	维修性的指标与有效度	(319)
第七章	提高内燃机可靠性的途径	
第一节	引言	(335)
第二节	近代内燃机的可靠性指标	(335)
第三节	内燃机零件的故障模式与机理	(344)
第四节	提高内燃机可靠性的途径	(351)
附表		(362)
参考书目		(370)

第一章 可靠性的基本概念

第一节 引言

内燃机的可靠性，是衡量内燃机质量的重要指标之一。可靠性差，不仅造成内燃机使用率低、使用费用高，而且对民用内燃机还将直接影响工农业生产，对军用内燃机，则直接影响作战能力。

在工程上开始可靠性的研究工作，是在第二次世界大战时从军用的电子设备常出故障而引起的。当时，美军运到远东的武器中60%的飞机不能使用，电子设备有50%在库存中就发生了故障；海军的电子设备70%是有故障的；而在电子设备中，又主要是电子管出故障。因此，美国在1943年成立了电子管发展委员会，专门针对电子管可靠性的问题进行研究，发现了电子管的故障，是因为在电子管的设计制造和使用中没有考虑可靠性的结果。以后又相继成立了一些研究机构，确定了高可靠度的规格。除了电气特性之外，还提出了振动、冲击等环境因素。与此同时，振动与冲击的试验、测量等技术也进一步发展起来。进入50年代，可靠性研究的范围从电子管扩大到整套电子设备，并对可靠性问题作系统的研究。以后，日本、英国、法国、苏联等相继都开展了可靠性研究工作。特别是60年代，由于空间科学和宇航技术的发展，可靠性的研究水平得到了进一步的提高，其研究的范围

从电子设备扩展到了机械系统。70年代以来，先进的工业国家已将可靠性技术应用到很多军用民用机械产品中，以取得可靠耐用的优化结构，成为优化设计的一个组成部分。

我国由于各种原因，对可靠性问题的研究开展得比较晚。对内燃机的可靠性问题的研究工作，开展得尤其缓慢。过去对于内燃机的研究工作，往往片面追求技术性能指标，而常常采用先达到性能指标，再逐步提高可靠性的做法。结果不少工厂只能生产出新产品的样品，却不能大量生产出商品。对于新生产的内燃机，质量管理工作也只是注意产品的性能指标，对可靠性管理问题也重视不够，使得不少新产品故障频出、寿命短、修理所花时间长。

随着工农业的发展，对内燃机的要求不断地提高，不仅要求性能好、价格低，而且还要求尺寸小、重量轻，特别是车用内燃机，愈来愈要求体积功率大、比重量小。为了达到所要求的目 的，往往采取提高转速、增压等强化的方法。因而，可靠性问题愈来愈突出，这才愈来愈引起了重视。

如同其它产品一样，内燃机的可靠性和研究、设计、制造、维修、使用以及运输等各个环节都有关系，特别是和设计好坏关系更密切。因此，本书在介绍可靠性的基本概念的基础上，着重介绍可靠性设计，同时也介绍制造、维修与使用等有关可靠性问题。

第二节 可靠性与可靠性的度量

可靠性是指零部件、机器、设备或系统在规定的使用条件下，在规定的时间内，完成规定功能的能力。零部

件、机器、设备或系统，在规定的使用条件下，在规定的时间内具有完成规定功能的能力，就是可靠；如果在规定的使用条件下，在规定的时间内发生故障或失效[⊖]，失去完成规定功能的能力，就是不可靠。

机器或设备是由许多零部件装配而成的。它们的可靠性比起零部件，特别是比零件要复杂得多，这是因为机器或设备的组装情况对可靠性有很大影响。若干种机器或设备组成的系统，又比机器或设备的可靠性复杂。从广义说，系统一般还包括有关参与的人员。

使用条件是指温度、湿度、气压、振动等环境条件，以及使用方法、维护方法等条件。它们对零部件、机器、设备或系统的可靠性有很大影响，因此，对产品的使用应有一定的规定。

产品的可靠性是随时间而变化的，一般随着使用时间的增加产品是会损坏的。因此，对使用时间的要求，要有明确的规定，有时不是规定时间，而是规定相当于时间的指标，如作用次数、重复次数、行驶距离等。

内燃机是由许多零部件组装而成的，它的可靠性问题十分复杂。内燃机的可靠性，首先是和它的零部件的可靠性有关。作为一个机器来说，它还和规定的使用条件有关。内燃机的使用条件包括使用环境（气温、湿度、气压、风沙情况等）、工作条件（固定式、可移式、车辆用等）以及使用方法和维护好坏等。条件越差，可靠性就越低。同时，随着内

[⊖]在英文中，故障与失效是同一词，但我国通常对不可修复产品称为失效，而对可修复产品称为故障。

燃机使用时间的增加，可靠性也越来越差。内燃机的可靠性与规定的功能有着极为密切的关系。所谓规定的功能，就是内燃机的性能指标，如动力性、经济性和适应性等。同一内燃机，如果标定功率、标定转速不同，可靠性也就不一样。在规定的条件下与规定的时间间隔中，达不到规定的功能，就称为内燃机发生了故障。

产品的故障情况有多种多样，但是一般可以按照发生的原因、性质、时期以及产生的后果来分类。

按照故障发生的原因，一般可以分为自然性故障、人为性故障与二次故障等三种。自然性故障是由环境条件恶化、材料缺陷以及安装不合理等造成的。如内燃机在过高的气温条件下工作，或者主要零件的材料有缺陷等。人为性故障是由于未按操作规定或维修、管理不当等造成。例如汽车用水冷内燃机在冬季严寒气候条件下使用时未加入防冻液，或夜晚停机时未放冷却水而引起冻裂等。二次故障（又称从属故障）是因其它部分的故障而造成的故障。例如，内燃机的曲轴箱体因连杆折断而被击破，就是属于二次故障。

按照故障发生的性质，一般可分为渐进性故障与突发性故障两种。渐进性故障是由磨损的累积造成，是事先可以检查和维修的故障。例如，内燃机气缸套、轴颈、轴承等的磨损，管系的腐蚀等。突发性故障是由外界随机因素或材料内部潜在缺陷造成的，发生故障的概率往往与工作时间无关，事先来不及检查与预防。例如，车用内燃机因车辆碰撞或火灾而引起损坏，或者由于操作失误以及一些零件因内部潜在缺陷等原因而引起损坏。

按照故障发生的时间，一般可分为早期故障、使用期故

障与损耗期故障。关于这三时期故障情况将于第三节详细论述。

按照故障产生的后果，一般可分为局部性故障与致命性故障两种。局部性故障是指由于故障导致产品丧失部分功能，但还能继续使用，例如内燃机个别喷油器发生故障，内燃机仍能继续工作。致命性故障，又称完全性故障，是指由于故障导致产品丧失工作能力，例如内燃机的曲轴折断等。

在研究可靠性时，要明确故障的情况与属于哪一类别，以便作为鉴定、评价与改进产品可靠性的依据。

从发生故障后能否修复的情况来看，产品有两类：一类是产品发生故障后不能修复，称为不可修复产品，如电灯泡就是属于这一类；另一类是产品发生故障后可以修复继续使用，称为可修复产品，内燃机就是属于这一类。对于可修复产品，除了考虑如何提高可靠性之外，还要考虑如何提高维修性。因此，一般将不可修复产品的可靠性称为狭义可靠性，而将可修复产品的可靠性称为广义可靠性，也就是可修复产品的可靠性包括了产品的维修性。内燃机是可修复产品，所以研究内燃机的可靠性还必须研究内燃机的维修性问题。

为了定量研究可靠性问题，使含糊不清的所谓“可靠”、“不可靠”在技术上有统一明确的尺度，作为衡量产品可靠程度的标准，通常以下列一些指标作为度量与评价可靠性的指标。

一、可靠度

可靠度是零部件、机器、设备或系统在规定使用条件下和在规定时间间隔内完成规定功能的概率。所以用概率这一尺

度来衡量产品完成规定功能的能力，是因为产品在规定使用条件下和规定的时间间隔内有可能完成规定功能，也有可能不能完成规定的功能，也就是有可能失效或出现故障，也有可能不失效或不出现故障。显然，产品完成规定功能这种事件，是一种随机事件。因此，在研究可靠性问题时，用完成规定功能的概率来表示产品的可靠性。

知道可靠度并不能够确切地预测某一产品的工作状态是处于故障（或失效）状态或是完成规定功能的工作状态，因为这是一个随机事件。但是大量的随机事件是包含着一定的规律性的。虽然不能准确地知道故障（或失效）的时刻，但是可以估计在某个时刻内，产品完成规定功能的概率。例如，某内燃机工作500h的可靠度为99%，即表示多次抽取100台内燃机在规定使用条件下工作500h，平均约有99台能完成规定的功能。

如果用随机变量 T 来表示产品从开始工作到发生故障（或失效）的连续工作时间，用 t 表示任意时刻，则产品在该时刻的可靠度 $R(t)$ 为随机变量 T 大于时间 t 的概率，即

$$R(t) = P(T > t) \quad (1-1)$$

如果，一批产品有 N 个，从开始工作到 t 时刻内，有 $n(t)$ 个发生故障（或失效），则当 N 足够大时，产品在该时刻的可靠度可以近似地用它的不发生故障（或失效）的概率表示，即

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

假设有220台内燃机，工作到500h时有20台发生故障，工作到1000h时，总共有106台发生故障，则这批内燃机在

500h时的近似可靠度为

$$R(500) = \frac{N - n(500)}{N} = \frac{220 - 20}{220} = 90.91\%$$

而在1000h的近似可靠度为

$$R(1000) = \frac{N - n(1000)}{N} = \frac{220 - 106}{220} = 51.82\%$$

可以看出,产品的可靠度是时间的函数,随着时间的增长,产品的可靠度越来越低,最后可靠度为零。因此,可靠度是一个介于1与0之间的函数,即 $1 \geq R(t) \geq 0$ 。

二、维修度与有效度

前面已指出,广义可靠性(即可修复产品的可靠性)包括产品的可靠性与维修性。所谓维修性,是指可修复产品在规定条件下使用时,在规定时间内,按规定的程序和方法进行维修,使之保持或恢复到能够完成规定功能的能力,也就是指可修复产品日常维修的方便性、修理的易行性与恢复原有功能的可能性。良好的可维修性,可使产品便于维修,减少维修工时,节省维修费用,迅速恢复产品的可靠性。

维修度是度量维修性的定量指标。它是指可维修性产品在规定条件下进行维修时,在规定时间内完成维修的概率。由于产品故障或损坏的情况不同,维修时间也各不相同,不是一个常量,而是以某种统计方式分布的随机量,因此,维修度也是维修时间 t 的函数,通常以 $M(t)$ 表示。如果用随机变量 T_R 表示产品完成维修实际所需的时间,用 t 表示任意时刻,则产品在该时刻的维修度 $M(t)$ 为随机变量 T_R 小于或等于 t 的概率,即

$$M(t) = P(T_R \leq t) \quad (1-2)$$

如同可靠度一样，维修度也是一个介于1与0之间的函数，即 $1 \geq M(t) \geq 0$ 。

关于维修性的其它指标以及维修性的其它问题，将于第六章再论述。

有效度是衡量可修复产品有效性的定量指标。所谓产品的有效性（也称为有用性或可用性）是指产品在全部使用过程中能够有效工作的程度。有效性好，产品能够工作的时间就长，不能工作的时间就短。与可靠性、维修性相类似，有效性也是用概率来表示，称为有效度。有效度是指可修复产品在规定使用条件下和规定时间内，维持其功能处于正常状态的概率。一般以有效度作为可修复产品广义可靠度的度量指标。有效度也是时间 t 的函数，通常以 $A(t)$ 来表示。

设某产品的使用时间为 t_0 ，维修所容许的时间为 t_m （它远小于 t_0 ），则该产品的可靠度、维修度和有效度分别为 $R(t_0)$ 、 $M(t_m)$ 和 $A(t)$ ，它们之间的关系为

$$A(t) = R(t_0) + [1 - R(t_0)]M(t_m) \quad (1-3)$$

式中的右端第一项是在时间 t_0 内不发生故障的可靠度；第二项包括在时间 t_0 内发生故障的概率 $[1 - R(t_0)]$ 和在时间 t_m 内修好的概率 $M(t_m)$ 。可靠度、维修度和有效度三者关系如图 1-1 所示。

由图可见，要得到高的有效度，可以通过提高可靠度或者提高维修度得到，即使可靠度很低，如果提高维修度也可以提高所需的有效度。不过，如果可靠度很低，就会经常发生故障，从而增加了维修费用；而随着可靠度的提高，虽然维修费用可以降低，却导致采购费用（投资费用）增加。因

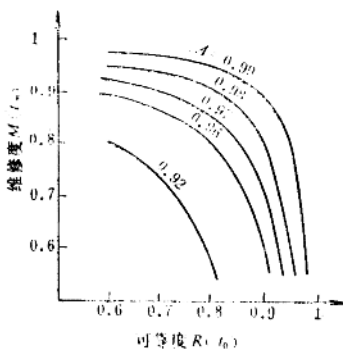


图1-1 可靠度、维修度与有效度的关系

此，在设计产品时要选择最佳的可靠度。从图 1-2 所示可靠度与费用的关系曲线，可以很清楚地看出这一点。

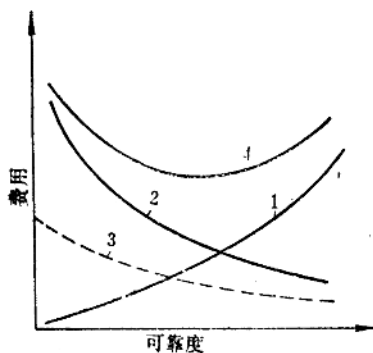


图1-2 产品可靠度与费用的关系曲线

1—研制投资费用；2—使用与维修总费用；3—维修费用；4—总成本。

因此，对于产品的广义可靠性来说，在考虑提高可靠度的同时，还要考虑提高维修度。

三、故障率

故障率又称为失效率，也有称为危险率或风险率的，是指产品工作到某一时刻时，在单位时间内发生故障或失效的概率。所以也常用故障率的大小来衡量产品的可靠性。

故障率是一个条件概率，也是时间的函数，一般以 $\lambda(t)$ 来表示。假设有可靠度为 $R(t)$ 的产品 N 台，工作到 t 时刻已发生故障的台数为 $n(t)$ ，工作到 $(t + \Delta t)$ 发生故障的台数为 $n(t + \Delta t)$ ，则故障率 $\lambda(t + \Delta t)$ 就是反映产品在 Δt 时间内发生故障的概率，可以由该产品在 $(t, t + \Delta t)$ 间隔的单位时间内发生故障的产品数相对于在 t 时刻还在工作的产品数的百分比值来求出。

假定 N 台产品的可靠度为 $R(t)$ ，则从 t 到 $t + \Delta t$ 时刻发生故障的台数就为

$$NR(t) - NR(t + \Delta t) \quad (1-4)$$

而产品在 t 时刻在正常工作的产品数为 $NR(t)$ ，因此，在 $t + \Delta t$ 时刻的故障率为

$$\lambda(t + \Delta t) = \frac{N[R(t) - R(t + \Delta t)]}{NR(t)\Delta t} \quad (1-5)$$

在实际计算时，可以近似表示为

$$\lambda(t + \Delta t) = \frac{n(t + \Delta t) - n(t)}{[N - n(t)]\Delta t} \quad (1-6)$$

这对于 N 足够大，而 Δt 又很小时，称为该产品在 $(t + \Delta t)$ 时刻的瞬时故障率。

例如，有100台内燃机，在第50h内都没有发生故障，在50~51h内有一台发生故障，51~52h内有3台发生故障，则该内燃机在51h时的故障率为

$$\begin{aligned}\lambda(51) &= \frac{n(t + \Delta t) - n(t)}{[N - n(t)]\Delta t} \\ &= \frac{n(51) - n(50)}{[100 - n(50)](51 - 50)} \\ &= \frac{1 - 0}{(100 - 0)(51 - 50)} \\ &= 0.01 \quad 1/h\end{aligned}$$

而在52h时的故障率为

$$\begin{aligned}\lambda(52) &= \frac{n(52) - n(51)}{[100 - n(51)](52 - 51)} \\ &= \frac{4 - 1}{(100 - 1)(52 - 51)} \\ &= 0.0303 \quad 1/h\end{aligned}$$

如果统计的产品 N 较少，而且间隔 Δt 又很大时，则只能计算出产品在 $(t, t + \Delta t)$ 时刻的平均故障率 $\bar{\lambda}(t, t + \Delta t)$ 。同样，假定有 N 台产品，在 t 时刻已发生故障的台数为 $n(t)$ ，在 $(t + \Delta t)$ 时发生故障的台数为 $n(t + \Delta t)$ ，则在 Δt 时间间隔内有：

平均完好台数为

$$\bar{N}_*(t) = \frac{1}{2}[(N - n(t)) + (N - n(t + \Delta t))]$$

平均工作时间为

$$\overline{N}_s(t) \Delta t$$

发生故障的台数为

$$n(t + \Delta t) - n(t)$$

因此，在 $(t, t + \Delta t)$ 间隔内的平均故障率为

$$\overline{\lambda}(t, t + \Delta t) = \frac{n(t + \Delta t) - n(t)}{\overline{N}_s(t) \Delta t} \quad (1-7)$$

统计了10台某军用柴油机的故障情况如表1-1所示。

表1-1 某军用柴油机故障情况统计表

工作时数(h)	0~200	200~300	300~400	400~500
故障台数	3	1	2	2

由表1-1中数据计算 $(0 \sim 200)$ h区间内的平均故障率为

$$\begin{aligned} \overline{\lambda}(0, 200) &= \frac{n(200) - n(0)}{\frac{1}{2} [(10 - n(0)) + (10 - n(200))] \times 200} \\ &= \frac{3 - 0}{\frac{1}{2} [(10 - 0) + (10 - 3)] \times 200} \\ &= \frac{3}{8.5 \times 200} \\ &= 0.001765 \quad 1/h \\ &= 176.5 \quad 1/10^5 h \end{aligned}$$

在 $(200 \sim 300)$ h区间内的平均故障率为

$$\overline{\lambda}(200, 300) = \frac{4 - 3}{\frac{1}{2} [(10 - 3) + (10 - 4)] \times 100}$$