

可靠性工程 及其在化工设备中的应用

戴树和 王明娥 编著

化学工业出版社



79.518

822

C.2

可 靠 性 工 程 及其在化工设备中的应用

戴树和 王明娥 编著

2622.1/5

化学工业出版社

内 容 提 要

本书共分七章, 包括: 绪论, 概率统计基础, 失效模型, 可靠性设计, 可靠性试验与预测, 可靠性分析在断裂力学中的应用和可靠性分析在疲劳研究中的应用等。书中阐明可靠性技术的基本理论, 并列举石油化工、化工生产设备应用可靠性工程分析的实例。

本书供从事化工设备、压力容器、动力锅炉和管路的研究、设计、制造和管理的工程技术人员阅读, 也可作高等院校化工机械专业和有关专业的研究生或高年级学生的学习参考, 以及工程师继续教育教材。

可 靠 性 工 程 及其在化工设备中的应用

戴树和 王明娥 编著

责任编辑: 孙世斌 张红兵

封面设计: 许 立

化学工业出版社出版

(北京和平里七区十六号楼)

化学工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ 印张 $11^{1/2}$ 字数316千字印数1—3,870

1987年4月北京第1版1987年4月北京第1次印刷

统一书号15063·3966定价3.10元

前 言

第二次世界大战末期，德国V-I型火箭的诱导装置开始应用可靠性分析方法，第一次定量地表达了产品的可靠性。随后，五十年代初期，可靠性问题被系统地加以研究，其研究范围从电子工业开始，逐渐扩展到宇航、动力、土木建筑结构直至机电产品。随着科学技术的发展，可靠性工程作为一门新的学科，现在已应用于各个领域，为人们所重视。

对于化学工业和石油化工而言，可靠性工程的应用更有其特殊、重要意义。工艺流程的复杂，各种控制仪表和自动装置的使用，机械设备运行条件的严酷，新材料、新技术、新工艺的应用，以及易燃、易爆、毒害介质等，无论从生产系统或单元设备来衡量，都对可靠性问题提出较高的要求。因为一旦发生事故，很可能是灾难性的，不仅经济受到损失，环境被污染，而且会造成人身伤亡。

可靠性工程是一门综合性工程学。系统、装置或零部件的可靠性，现代已是衡量它们质量的重要指标。首先应从设计上满足可靠性的要求，然后在制造中控制质量、严格检验，并在运行中遵循“后勤工程学 (Logistic Engineering)”的原则，提高管理水平，加强维护修理，采取措施，加以保证。

当今科学技术迅速发展，多学科相互渗透，无论对于工程技术人员还是管理人员，掌握可靠性工程的基本知识并应用于工程实际，已是大势所趋。本书就是在这种形势下，根据作者为化工机械专业研究生编写的教材和为工程师继续教育学习班所编写的讲义，重新加以补充和修订而编写的。全书叙述简单扼要，略去繁琐数学推导，注重实用，便于自学。书中列举化工和石油化工生产设备应用可靠性工程的实例，其中包括作者近年来在开展可靠性工程分析

方面的某些研究成果，尽管尚属初步探索，但为了在我国化工和石油化工领域开拓这一新兴学科，仅作为引玉之砖，敬请读者指正。

全书由戴树和主编，第一章至第五章由戴树和执笔，第六、七章由王明娥执笔。

因限于水平和时间，书中谬误之处当不在少，热忱期望读者予以批评指正。

戴树和、王明娥于南京化工学院

1986年7月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 概述	1
第二节 基本概念	2
第二章 概率统计基础	11
第一节 随机变量的数字特征	11
第二节 常用的概率分布	17
一、正态分布	17
二、对数正态分布	19
三、伽玛分布	23
四、威布尔分布	23
五、指数分布	29
六、极值分布	30
第三节 统计推断	31
一、分布适应性检验	34
二、概率分布中的参数估计	40
第四节 回归与相关	57
一、回归分析	57
二、相关	61
第三章 失效模型	63
第一节 应力-强度模型（干涉模型）	63
一、应力、材料强度均为正态分布时可靠度的计算	66
二、应力、材料强度均为对数正态分布时可靠度的计算	68
三、应力、材料强度均为威布尔分布时可靠度的计算	70
四、应力为正态分布、材料强度为威布尔 分布时可靠度的计算	71
第二节 最弱环模型	73
第三节 反应论模型	75
一、蜕化现象	76

二、累积损伤模型	78
三、剩余强度模型	80
第四节 纤维束模型	83
第四章 可靠性设计	85
第一节 设计参数的确定	86
一、函数的统计特征值	86
二、工程材料性能数据的统计意义	90
三、统计偏差	92
第二节 结构的可靠性分析	97
一、可靠度系数	97
二、设计验算点	101
三、当量正态分析方法	107
第三节 可靠度与安全系数	126
一、平均安全系数	126
二、概率安全系数	128
三、随机安全系数	129
第四节 贝叶斯(Bayes)方法在可靠性设计中的应用	132
一、贝叶斯方法	132
二、贝叶斯方法在工程不确定性问题中的应用	135
第五节 可靠度的分配	138
一、等同分配法	138
二、相对失效率法	140
三、AGREE法	142
四、动态规划法	144
五、拉格朗日(Lagrange)乘子法	151
第五章 可靠性试验与预测	156
第一节 寿命试验和加速试验	156
一、寿命试验	156
二、加速试验	160
第二节 序贯寿命试验	166
一、基本概念	166
二、服从二项分布的序贯寿命试验	169
三、服从指数分布的序贯试验	172

第三节	方差分析	175
一、	单因素试验	175
二、	双因素试验	178
三、	拉丁方、希腊拉丁方和其它试验方法	181
第四节	统计试验法	187
一、	随机数的产生	190
二、	随机变量的抽样	191
三、	降低方差的方法	196
四、	概率模型	199
五、	应用举例	205
第五节	故障树分析	208
一、	故障树的构造	209
二、	最小割集和最小路集	210
三、	顶事件发生概率的计算	216
四、	结构重要度	219
第六章	可靠性分析在断裂力学中的应用	229
第一节	断裂力学主要参数的统计特性	230
一、	缺陷的统计特性	231
二、	材料本身的统计特性	236
三、	缺陷力学条件的不准确性	239
四、	结构几何尺寸的不确定性	241
第二节	缺陷的评定	241
一、	缺陷评定准则	242
二、	残余缺陷的分布	243
三、	统计试验法的应用	244
四、	疲劳裂纹扩展模型的建立	247
第三节	概率断裂力学的应用	252
第七章	可靠性工程在疲劳研究中的应用	273
第一节	载荷历程及其概率特性	273
一、	载荷谱的编制	273
二、	典型的累积频数曲线	285
第二节	疲劳试验与统计分析	291
一、	$S-N$ 曲线和 $P-S-N$ 曲线	291

二、统计方法确定疲劳极限	296
三、子样容量	299
第三节 疲劳寿命统计特性	300
一、定幅值载荷下, 疲劳寿命的分布特性	300
二、随机载荷作用下, 疲劳寿命的分布特性 (累积损伤的统计性质)	306
第四节 承压部件疲劳强度的可靠性设计	310
一、承压部件的疲劳设计	310
二、疲劳分析和可靠度计算举例	315
附表	325
参考文献	357

第一章 绪 论

第一节 概 述

可靠性工程学的研究工作最近在国内外都发展很快。从电子工业、军事工业、宇航、直至机电产品等各个行业和部门，几乎毫无例外地都对这一门工程学给予重视，并进行了大量的研究工作。

可靠性问题之所以受到重视，是因为系统、装置（机器及设备）或零部件所承担的工作要求越来越高，结构也更为复杂化。因此，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有所增加，而整个系统的失效或故障将使生产受到威胁、经济受到损失，甚至人的安全遭到危害。除此以外，由于新技术的采用、新材料的应用，没有研究的领域和亟待开发的问题还很广阔，所有这些都是不可靠不安全的因素。加之，由于装置的高性能、高操作运行条件，存在着控制与管理引起失误的可能性，所有这些问题的解决，绝不是一般手段可以应付得了的。综合性的工程技术——可靠性工程学正是针对这个范畴问题而发展起来的。

可靠性工程学的研究对象，可以是零部件，也可以是由许多零部件装配成的装置，或由一些装置组成的系统。它们在使用期间，寿命都是有限的。在使用中会不断磨损、腐蚀、疲劳或老化，以致发生故障。系统、装置或零部件发生故障有两种情形：一种是发生故障后就报废，不能继续使用；另一种是发生故障后可以修理，继续使用。为了制造尽可能少发生故障的产品所采用的一切方法，和在运行中为避免发生故障所采取的一切措施，都是可靠性工程学的研究内容。亦即在系统、装置或零部件的研究、设计、制造、安装、使用和维修等各个环节，都有造成故障的可能，也有发现故障的原因和给予改善的可能。所有这些环节都需要应用可靠性工程学的技术。

机械装置能否获得高水平的实际使用可靠性，取决于这个装置的设计和整个使用期（或称寿命期）的运行情况。通过设计可以确定装置的固有可靠性。而从设计图纸转化为产品，则会使实际可靠性低于固有可靠性水平。因此，为了正确地估计产品的可靠性，必须首先对设计特性进行研究，这个设计特性一般定其为可靠性的上限，然后用制造、使用和维修退化等一系列系数加以修正。

第二节 基本概念

在可靠性工程学中，可靠性代表系统、装置或零部件在规定时间内运行稳定的程度。如欲定量量度，常用可靠度、不可靠度、失效率、平均失效间隔、失效前平均工作时间、维修度和有效度等来表示。

可靠度，用 $R(t)$ 表示。它的含义是：系统、装置或零部件在规定的条件下和规定的时间内完成规定功能的概率。其值在 $0\sim 1$ 之间。一般表示为时间 t 的函数。

不可靠度或累积失效概率，简称失效概率，用 $F(t)$ 表示，有时也用 P_f 表示。它的含义是：系统、装置或零部件在规定的条件下和规定的时间内不能完成规定功能的概率。其值在 $0\sim 1$ 之间。显然有：

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

根据可靠度或不可靠度的定义，**概率、功能、时间和规定的条件**是四个颇为重要的因素。在决定系统、装置或零部件的可靠度或不可靠度上，它们每一个都起着重要作用。

一般地说，假设某一试验，如果事先不能准确地预言它的结果，而且在相同的条件下可以重复进行，这个试验就称为**随机试验**。随机试验的每一个可能结果称为**随机事件**。倘若 n 次试验中，产生某种结果（譬如：称为事件 A ）有 m 次，则称 m/n 为事件 A 出现的频率。经验证明，当试验次数 n 很大时，随机事件的频率是稳定的，这个稳定值叫做事件 A 出现的**概率**，记为 $P(A)$ 。所以，概率定义为一个特定形式事件出现的可能性。有下列关系：

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

(1-2)

$$P(A) = \begin{cases} 1 & \text{随机事件 } A \text{ 必然发生} \\ 0 & \text{随机事件 } A \text{ 不可能发生} \end{cases}$$

(1-3)

描述全部随机变量值和它们概率关系的函数，一般用概率密度函数和累积分布函数。举例阐述如下。

〔例题〕 40MnVB调质钢试件拉伸强度限试验的结果示如表1-1。将强度限 (σ_b) 划分为若干间隔后出现的次数和频率列于表1-2。图1-1 是表1-2 中的频率与强度限间隔值做出的图形，这个图叫做直方图。它表示40MnVB调质钢试件强度限出现的概率密度图线，或概率分布图。当试验次数足够多、对应的强度限间隔取得足够密时，可以得到图中的连续曲线，从而拟合出概率密度函数的数学表达式。不同的随机变量有着不同的概率密度函数表达式。

表 1-1 40MnVB调质钢试件拉伸强度试验数据

试件号	σ_b, MPa	试件号	σ_b, MPa	试件号	σ_b, MPa	试件号	σ_b, MPa
1	844	8	862	15	870	22	846
2	846	9	844	16	841	23	850
3	844	10	842	17	842	24	846
4	855	11	851	18	856	25	845
5	843	12	833	19	870	26	858
6	842	13	831	20	842	27	862
7	850	14	836	21	858		

表 1-2 按强度限间隔的出现次数和频率

强度限间隔, $\Delta\sigma_b, \text{MPa}$	出现次数	频 率
822.5~832.5	1	0.037
832.5~842.5	7	0.259
842.5~852.5	11	0.407
852.5~862.5	6	0.222
862.5~872.5	2	0.074

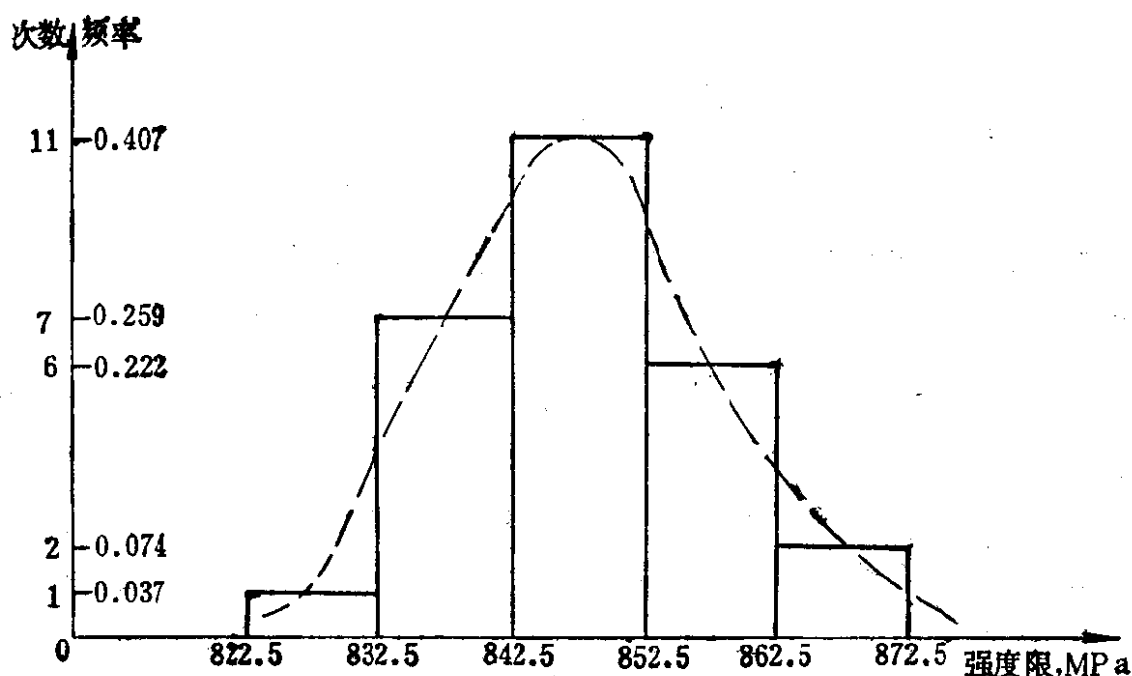


图 1-1 概率密度分布图

至于累积概率分布函数，同概率密度函数相似，也是描述随机变量概率分布的一个函数。它们之间有着一定的关系。设 t 为随机变量， $f_i(t)$ 为概率密度函数，则累积概率分布函数 $F_i(t)$ 的计算公式为

$$F_i(t) = \int_{-\infty}^t f_i(t) dt \quad (1-4)$$

图1-2中所表示的累积概率分布函数，可以写成：

$$F_i(t) = P(t_0 < t \leq t_1) = \int_{t_0}^{t_1} f_i(t) dt = \Omega \quad (1-5)$$

其中 Ω 是 t_1 以左概率密度函数曲线下包罗的面积。如果 t 代表时间的度量单位， $f_i(t)$ 代表失效概率密度函数，则 $F_i(t)$ 即为累积失效概率或不可靠度， $P_f = F_i(t)$ 。

假若 $F_i(t)$ 存在一阶导数，则由式1-4可以得到：

$$f_i(t) = \frac{dF_i(t)}{dt} = - \frac{dR(t)}{dt} \quad (1-6)$$

而

$$\left. \frac{dF(t)}{dt} \right|_{t=t_2} = f_1(t_2), \text{ 参见图1-2。}$$

且有 $F_1(-\infty)=0$; $F_1(t) \geq 0$ 是 t 的增函数;
 $F_1(+\infty)=1$; $F_1(t)$ 是 t 的连续函数。

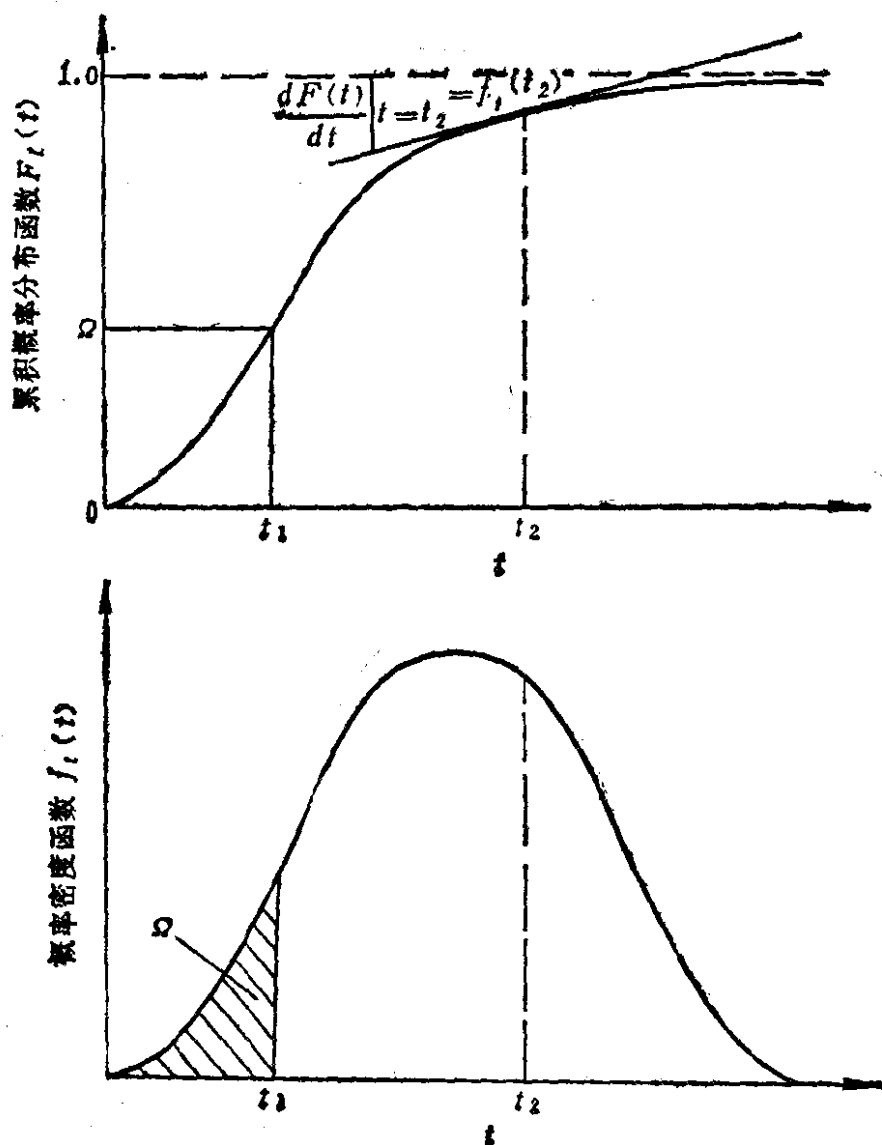


图 1-2 概率密度函数和累积概率分布函数

以上对于可靠度或不可靠度定义中包括的四个重要因素之一的概率及其有关函数分布等做了阐述。下面拟对其它三个因素再做必要的说明。

功能是可靠度或不可靠度定义中第二个要素，表示必须建立评定系统、装置或零部件运行良好的准则，需要有关于系统、装置或

零部件功能的定性、定量综合性指标。

时间是最重要的因素。它是与系统、装置或零部件性能好坏程度直接有关的一个量度。它可以用时间表示，也可以用次数或距离等表示。例如：通常设备的工作期限用小时或年表示；汽车、火车的工作期限用行车里数表示；零部件的疲劳寿命用循环次数表示。

特定条件包括系统、装置或零部件所处的环境条件和维修条件。如承受的载荷、介质腐蚀、环境温度、润滑状况等。

失效率或故障率，用 $\lambda(t)$ 表示。它的含义是：在寿命期的度量单位内，系统、装置或零部件失效的概率；或者，系统、装置、零部件在 $[0, t]$ 时段内没有发生失效的前提下，在 $[t, t + dt]$ 时段内发生失效的条件概率。

根据条件概率的定义，假设事件 A 表示在 $[0, t]$ 时段内没有发生失效；事件 B 表示在 $[t, t + dt]$ 时段内发生失效，则事件 A 发生时，事件 B 发生的概率为：

$$P(B|A) = P(A \cap B) / P(A)$$

$$\text{故得} \quad \lambda(t) = -\frac{dR(t)}{dt} \cdot \frac{1}{R(t)} = \frac{f_r(t)}{R(t)} \quad (1-7)$$

$$\begin{aligned} \text{或者} \quad \lambda(t) &= -\frac{d \ln R(t)}{dt} \\ R(t) &= \exp \left[- \int_0^t \lambda(t) dt \right] \end{aligned} \quad (1-8)$$

不可靠度或累积失效概率表示在某一时段发生失效或出现故障的概率，主要反映产品在所有可能工作时间内的失效分布情况。而失效率则表示某一时刻没有破坏的产品在其后紧接着的一个单位时间内失效数或故障次数与该未破坏的产品数的比值，反映每一时刻的失效情况。

平均失效间隔，用 $MTBF$ (Mean Time Between Failures) 表示。它的含义是：可修复系统、装置或零部件，在相邻失效间隔的平均工作时间，即平均无故障工作时间。或称平均寿命。

$$MTBF = \frac{\text{总工作时间}}{\text{该时间的总失效数}}$$

对于失效率为常量的情况, $MTBF = \frac{1}{\lambda}$ (1-9)

失效前平均工作时间, 用 $MTTF$ (Mean Time To Failure) 表示。它的含义是: 不可修复系统、装置或零部件在失效前工作时间的平均值。即不能修复的产品从开始使用到发生故障的平均时间。

维修度, 是一项固有的设计特性, 它体现在完成维修职能时的方便性、安全性和经济性等方面。广义的维修度可以通过各项指标的综合作出评价, 如: 延续时间、人员的工时率、维修频度、维修费用以及有关的后勤保障指标等。维修可以分成两类:

1. 改善维修——指所完成的未安排计划的作业。例如发生事故后将系统、装置或零部件修复到规定的性能水平。

2. 预防维修——指所完成的安排有进度计划的作业。它通过进行系统、装置或零部件的检查、检测、维护保养、状态监测和更换零部件等措施防止即将发生的事故, 从而使系统或装置得以保持规定的性能水平。

维修包括诊断、排除或预防系统的各种事故的作业。维修时间是某个系统或装置所需的改善维修和预防维修各项作业时间的总和。维修度是评价对系统或装置进行维修时的方便和快速程度的指标, 它通过完成各项维修作业所需的时间来评价。

有效度, 是系统、装置或零部件在某一特定的瞬时能维持其功能的概率。它是时间的函数。用可能工作时间系数来表示的有效度是系统或装置在长时间使用的平均有效度。即

$$\text{有效度} = \frac{\text{可能工作的时间}}{\text{可能工作的时间} + \text{故障停机时间}}$$

上面叙述了可靠性工程分析中定量量度可靠性的各种表示方法。这样, 在设计和制造产品时, 就可以利用各种数学方法来计算或预测它们的可靠性, 也可以利用试验方法来评定可靠性。除此以

外，在实际工作中经常还会涉及到系统、装置或零部件的寿命问题。下面拟对此作一些说明：

系统、装置或零部件可能由于各种原因而失效。在可靠性研究中，将失效分为三种类型，失效率作为寿命的函数随时间而变化。典型的寿命特性曲线示如图1-3。

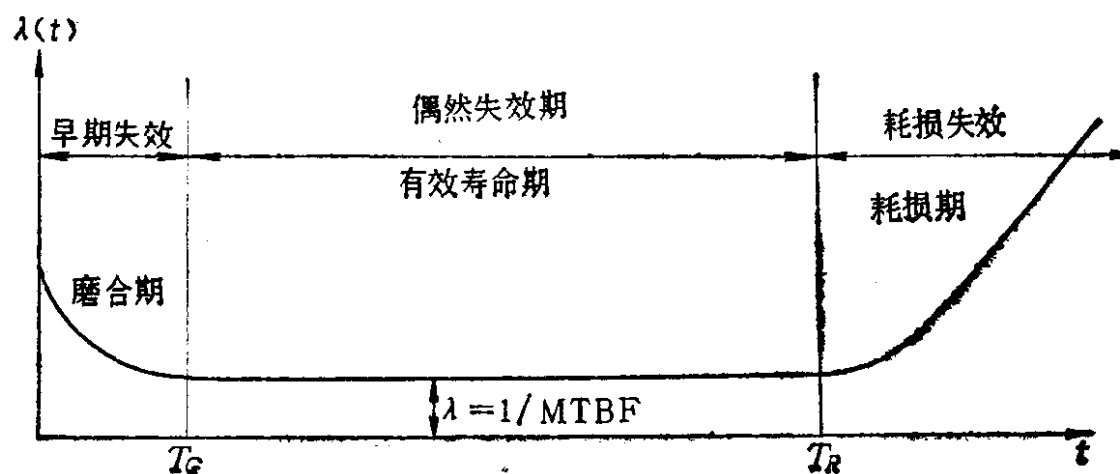


图 1-3 典型寿命曲线

图中示出的三个失效期代表了失效的三种类型。早期失效基本上反映了系统、装置或零部件的制造质量和对工艺的控制程度。它主要由于焊接或密封不良、零部件装配不当或其它在制造、安装、检验等过程中人为的失误而引起的。对于化工用压力容器来说，早期失效往往在质量检查，容器的水压试验或气密性试验，以及工艺试车或试运行过程中出现。

系统、装置或零部件排除了早期失效的各种故障后，投入正常运行，失效率达到最低水平。正常情况下，失效率几乎为一常量。这就是图1-3中的偶然失效期。不同类型的装置有着不同的偶然失效期。它是系统、装置或零部件可靠性预测和评价的最重要时期。

当使用寿命超过一定限度后，装置的失效率逐渐增高，或者虽然没有明显的失效，但通过检查或监测，发现异常现象，这就是寿命的第三寿命期、即耗损寿命期。装置的可靠性降低，主要由于腐