电子系统的物理设计

第四卷

系统可靠性

（三）

美国贝尔电话实验室

邮电部邮电工业标准化研究所

邮电部邮电工业产品结构设计情报网

一九八二年三月

目录

第四卷　系统设计过程

第三篇　系统可靠性

第三篇　　系统可靠性

第七章：可靠性——基本概念和分配

作者：R.C.Winans

电子系统除了完成他们所设计的功能之外，还必须在一定时间内能满意地完成这些功能的工作。在这个时间内，这个系统能满意地工作的能力就是它的可靠性。为何要设计可靠性和预先估计可靠性程度，原因就是本章和下两章研究的课题。

因为电子系统是由各种不同的电子元件或器件组装成的，所以系统的可靠性依赖于使用环境下的电子元器件可靠性。我们不可能对任何一个电子元器件预测它的寿命或在已知应力下的质量下降率。但是我们能够根据概率的基本原理，在可能接受的结果下，处理大量的这种元器件。元器件的统计特征关系到它的所属系统的统计特征。

实际上，可靠性是统计与系统有关某种特征概率的方法，这种系统不太适用于确定型方法。这种估计可产生以工程决策为基础的有用决定。

概率的引用，使在现有知识范围内不能够设计的复杂系统也能设计，在规定的时间内，一定不会失效。但是，现有可靠性工具，一般确能够允许系统设计人员得到失效的概率实际上可以低到所需要的数值。但这要对它付出一定的代价。它受经济的限制——美元和时间。可靠性这门科学是不能代替好的安全可靠工程设计；它不是在特殊问题最经济的解决办法中简化物理设计人员作业的另一种方法。在某种

意义上说，在这套文本的各章节中，大多数材料直接面向高可靠性。所以，这里着重强调的是在别处没包括的因素。

系统可靠性的各个有关方面，在本卷第3部分三个章节加以讨论。这节包括系统中各等级的基本概念和可靠性分配。第8章讨论电子元件的可靠性，因为这些元件对整个系统的可靠性非常重要。第9章包括通常作为预测和估计系统可靠性的一些方法，以及从集成电路日益增长的用途中预测其发展趋势。

§7—1 基本可靠性定义

采用某些技术计算可靠性以预测电子系统连续工作的概率。这些技术能帮助设计人员，非但在制订系统的计划阶段，而且在整个设计制造过程及在安装后的初始运行时期。用这种方法，我们终究会牵涉到在规定使用中电子元件的可靠性，并在运行不正常或失效以后对维修可靠性的影响。

系统正常运行"可靠性"和"可用度"这两个名词有它们明确的定义。一般承认的"可靠性"定义，是"在规定的时间周期内，在规定的条件下，一件事物能完成所要求功能的概率"。这一定义有三个基本要素：

1. "完成所需要的功能"。
2. "在规定条件下"
3. "在规定时间周期内"。

所要求的功能不仅包括正常运行的意义，也包括不正常运行或失效的意义。规定条件是指总的物理环境（机械的，热的，电的等等），在此条件下能作到满意的运行。"规定时间是指满意工作所需要的时

间周期。在军用设备中，例如导弹时间相当短并涉及到特殊用途。在通信设备中，每天24小时连续工作，一年工作365天，有时还规定一定的维修间隔时间，而取决于经济上和性能上的考虑。

第二个术语——“可用度”的定义是“一件事物当需要时能马上工作（运行）的概率”。“可用度”的另一个定义就是“希望系统工作，按平均时间的一瞬间，在任一情况下，可用度为预期的平均正常工作时间与失效后恢复到正常工作所必须的平均时间之比。

可靠性和可用度及其有关术语可用数学公式来下定义，如下各节所叙。

可靠性

假定系统在时间 $t=0$ 开始工作（运行），让我们用函数 $F(t)$ 表示在时间 t 或 t 以前，系统第一次失效的概率。这个函数是正的随机变量的累积分布函数（cdf）；即，

$$
\begin{aligned}
&F(t)=0 \quad t<0 \\
&0\leq F(t) \leq F(t') \quad 0\leq t\leq t' \quad \cdots\cdots\cdots (7\text{—}1) \\
&F(t)\rightarrow 1 \quad \text{当 } t\rightarrow\infty
\end{aligned}
$$

系统的可靠性，或在时间 t 不失效的概率表示如下：

$$R(t)=1-F(t) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (7\text{—}2)$$

这个定义适用于单个系统的重复运行周期也适用于许多这种系统同时并行工作的周期。

应该注意，这种表示允许 $R(0)<1$ 存在；即当系统首先被打开时，它可能不工作。

风险率

如果$t \geq 0$，$F(t)$派生出$f(t)$，后面一项具有概率密度函数(pdf)的特性，它与$F(t)$的关系如下：

$$F(t)=\int_0^t f(x)dx \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (7-3)$$

为了运行，维护和逻辑等使用目的，平常我们关心的是发生失效的概率。在s长的时间间隔内，这个时间内失效的概率为：

$$\int_t^{t+s} f(x)dx=\int_t^{\infty} f(x)dx-\int_{t+s}^{\infty} f(x)dx$$

$$=R(t)-R(t+s)$$

经过时间t和t+s的系统数；与$R(t)$和$R(t+s)$分别成比例。因此，系统经受t而失效的百分数如下：

$$\frac{R(t)-R(t+s)}{R(t)}$$

用时间间隔S除，在此时间间隔内平均失效率为：

$$\frac{R(t)-R(t+s)}{sR(t)}$$

如将它除以时间间隔S，可得出这一间隔内的平均失效率$\frac{R(t)-R(t+s)}{SR(t)}$风险率或瞬时失效率$h(t)$的定义是由上述公式$S\to 0$时的极限，对非肯定型公式的估价得出，

$$h(t)=-\frac{1}{R(t)}\cdot\frac{d(Rt)}{dt} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (7-5)$$

还有，由于

$$\frac{dR(t)}{d(t)}=-\frac{dF(t)}{dt}=-f(t) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (7-6)$$

风险率的等效公式为

$$h(t)=\frac{f(t)}{R(t)}=\frac{f(t)}{1-F(t)} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (7-7)$$

注意如果S为非常短的时间间隔，sf(t)乘积是在这个时间间隔内失效的总系统数的几分之一，而R(t)是在时间t运行的那一部分，那么就很容易证明公式(7－7)的合理性。在此时间间隔内失效的系统，是运行系统的一部分，其百分数就是这两个量的比值。

$$\frac{Sf(t)}{R(t)}$$

用时间S除这个表示式得出运行系统的失效率(风险率)，给出所示的相互关系。

可将公式(7－7)写成：

$$h(t)=-\frac{d}{dt}\ln[1-F(t)]$$

此处导出表示式。

$$R(t)=1-F(t)=\exp[-\int_0^t h(x)dx] \cdots\cdots\cdots (7-8)$$

公式(7－8)是用以确定简单系统可靠性的基本形式，适用于概率密度函数估价指数表示。

$$-\int_0^t h(x)dx$$

失效前的平均时间

常常用失效前的平均时间表示系统的可靠性，失效前的平均时间是从累积密度函数(cdf)F(t)中推导出的失效时间的期望值。

假设有关的概率密度函数 $f(t)$ 成立，则失效前的平均时间通用表示式为。

$$MTTF = \int_0^\infty xf(x)dx \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots (7-9)$$

也可以写成

$$MTTF = \int_0^\infty R(x)dx \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots (7-10)$$

如果一个系统运行直到它出故障为止，经过修复后，再次工作直到它发生故障，以后又修理和运行交错进行，可以了解为相同的 $F(t)$ 互不联系地应用于全部运行周期。如果是这样，象公式（7—10），对MTTF所下的定义也可认为是失效之间的平均时间或MTBF。这种类型系统接近于稳定状态条件，其中的MTBF实际上是个常数。如果总的运行时间变得很长，那么在这总周期时间内的平均失效率接近常数。

$$\lambda = \frac{1}{MTBF} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots (7-11)$$

可用度

如果用于运行时间的假设对于修理时间也适用，则我们可以假设以 $M(t)$ 的累积密度函数（cdf）修理时间代替 $F(t)$ 的，以概率密度函数 $m(t)$ 代替 $f(t)$ 的，和修理前的平均时间用下式给出。

$$MTTR = \int_0^\infty tm(t)dt \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots (7-12)$$

如果总的修理时间变得很长，在这总的系统修理时间的平均修理率接近一个常数。

$$\mu = \frac{1}{MTTR} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots (7-13)$$

如果把系统在时间 t 能运行的概率 $a(t)$ 称作在时间 t 的可用度，那么其数值，

$$A=\lim_{t\to\infty}a(t)=\frac{\mu}{\lambda+\mu} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(7-14)$$

称作为系统的极限可用度或简称可用度[2,3]。因此得出在非运行或非可用状态下的极限概率为，

$$\overline{A}=1-A=\frac{\mu}{\lambda+\mu} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(7-15)$$

推导公式（7—14）所用的假设是很一般而又简单的[4]。实际上已经证实了公式（7—14）有广泛的用途。例如，它可以估计失效率和维修率 λ 和 M。如果将这些估计值代入公式（7—14），那么就可以求出被估计的有用度 A_E 与选作性能和经济标准的某一目标值 A_O 相比。如果 $A_E<A_O$，估计值又相当精确，就可能显示出有可能进一步减小失效率或提高维修率，或两者兼有。这就提示设计一个更可靠的系统的可能性（例如，引进备用设备元件或监视电路）；标记某些元件作为更换或改进之用；设计更好的告警，维修程序测试装置等方式。

§7—2 系统的可靠性特征

系统的可靠性在很大程度上取决于其本身的子系统和元件器件的可靠性。确实，如果系统失效数与任何一个或多个K子系统的失效完全相符，而这些是统计地独立量，这个系统的可靠性 $R(t)$，可以 K 个单个子系统的可靠性 $R_1(t)$，$R_2(t)$，…… R_K 等的 乘积来表示，或

$$R(t)=\prod_{i=1}^{k} R_i(t) \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots(7-16)$$

这个乘积规律也适用于可用度，用上述相同条件。从公式（7—8）和（7—16），我们可以断定对独立的子系统，系统的风险率为各子系统风险率之和。

$$h(t)=\sum_{i=1}^{k} h_i(t) \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots(7-17)$$

因此，如果子系统的风险率具有共同特征，则在给定条件下将承继其同样特征。例如，在系统的整个寿命里，保持有故障和失效的记录，就能发现系统所组成的各子系统和更小的支系统的估计期望风险率。一般所具有的特征与图7—1所示的理想形式类似。这是传统地称为浴盆式曲线。寿命早期典型曲线是从高风险率开始，接着急速下降。再接下去是一个相当稳定的周期，这儿的风险率接近常数，表示正常使用时期的稳定运行阶段。

如果在全部子系统中具有固定风险率的共同时期，比如说，从 t_1 到 t_2，则公式（7—8）就导出第三个子系统的可靠性 $R_i(t)$ 的表示式，如下所示。

$$R_i(t)=C_i e^{-V_i t} \qquad (t_1<t<t_2) \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots(7-18)$$

式中 C_i 和 V_i 是正的常数。采用公式（7—16），这个周期范围内的总的可靠性为。

$$R(t)=\left(\prod_{i=1}^{k} C_i\right)\exp(-\Sigma\nu_i t) \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots(7-19)$$

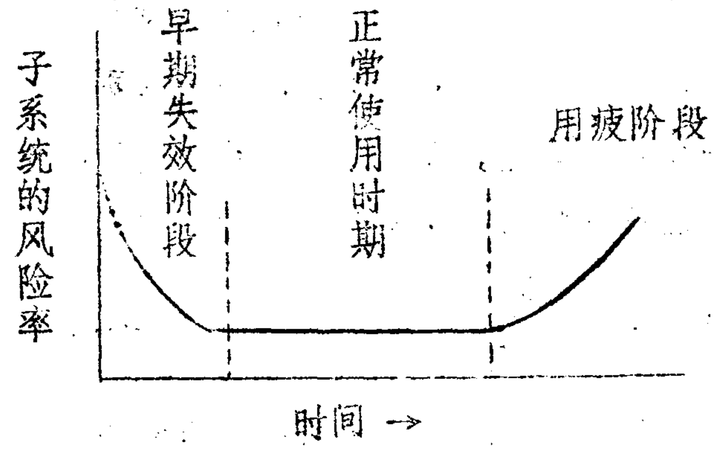

图7—1　一般风险率特征

维修效果(影响)

在正常使用期内需要修理或更换电子元器件以保证系统的完好功能。如果在修理子系统时，关闭系统修理之后，重新将这些子系统接入系统中，这样系统的风险率可望具有子系统的浴盆式风险率特征。确实，在某些时间点上，超过了有用寿命，以后还是很好，在图7—1中的使用疲劳阶段有各种现象会使风险率提高，表示寿命接近终了。

尽管这种条件存在，但许多电子系统经过适当的维护后，将不表现出寿命将终了的特征。当有些零部件出现明显的寿命终了的特征时，在它们没引起故障以前，就按时将它们更换掉的话，特别实际。就是当元器件失效时才更换或当风险率函数 $h_1(t)$，$h_2(t)$，………$h_k(t)$ 彼此很不相同更换，通常也是很正确的。平常电子系统在表现出损坏现象之前，已变得技术上不中用，接近寿命终了的寿命。

上面讨论的是属于系统中的那些子系统，从它们的寿命开始直到第一次发生失效为止的全部时间都装在系统上。现在我们希望讨论统计情况关于子系统被修理得如“新的一样好”，或用属于相同的统计类型的新子系统代替。系统和子系统的寿命不再是相同，系统本身工

作或多或少地独立。它的寿命受到陈旧限制而不是对于可靠性的考虑。

经过长时间之后，子系统因失效而更换，失效和更换的频次对于第三个子系统接近一个常数 λ_i。不论个别子系统的风险率特征如何都正确。我们可以对较大值的t和k在某种条件下表示出系统可靠性。

$$R(t)\rightarrow\exp\left(-\sum_{i=1}^{k}\lambda_i t\right) \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots(7\text{—}20)$$

大体上说，条件(1)在开始运行时，个别子系统就失效的可能性不太大。在早期运行时间失效风险很有限。(2)没有任何子系统提供的失效会远远超过任何其它的子系统。

用公式（7—20）所表示的限制形式，提供用于指数分布一个广泛的理论性原理，以说明系统寿命的整个正常使用期间的系统可靠性，在有限制性的假设条件下，这种相同的分布能说明系统寿命开始时的可靠性。但其结果对风险率性质非常敏感，用很不同的常数 $h_1(0)$，$h_2(0)$，……$h_k(0)$ 代替公式（7—20）的常数 λ_1，λ_2……λ_k。在任何情况下，系统失效的历史证明了指数分布对系统可靠性的表示很有价值。

随时间变化

再来讨论图7—1关于子系统的风险率特征，这适用于研究在系统寿命中和一个系统对另一个系统的风险率如何改变，当开始降低风险率的时期监视了许多系统。运行一年或几年之后，构成这些系统的子系统表现出风险率从初始风险率的 $\frac{1}{3}$ 降到 $\frac{1}{10}$ 。

早期失效和更换由下列原因引起：

1、系统和设备设计的有毛病。

2、设备制造的毛病和误差（错误）。

3、运输和处理上的应力。

4、测试和调试误差。

5、不适当的操作和维修程序。

6、电子元器件设计上有毛病。

7、元器件制造上有毛病或不合格。

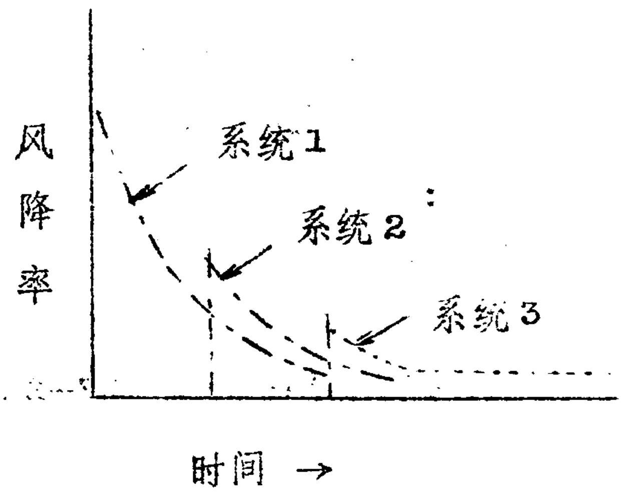

图7—2　表示连续制造各系统有改进后的风险率

从初样对正规产品和使用，对制造，装配和运行过程许多项目可以修改。图7—2表示最初连续生产的三个系统在规定期间内交付运行的情况。第二和第三个系统都进行了改进，这样降低了每个系统的初始风险率。但是，经验证明，初始风险率降低的现象继续存在，这是由于上述许多因素残留的结果。如用更换和修改的方法加以校正，则在正常使用期间内风险率接近常数。因此，在正常使用周期，子系统的风险率对应于公式（7—20）的λ_1，λ_2……，λ_k的常数。

在正常使用期，可将“失效率”这一名词术语用于风险率，因为实际上它可以认为是个常数，使用失效率这一词，能够大大简化，这个单一符号能表征正常使用周期间的子系统可靠性。和我们见到的一样，这个事实上随环境因素，例如温度而变化。只要用元器件的失效

率，就便于综合成系统的可靠性。所以如果子系统的失效率——以至数据的估计事先是有效的，那么用先进的制造方式乃至完整的设备可粗略地估计整个系统的可靠性。（称作黑盒估计）。值得强调的是这种估计只适用于假定失效率合理的时间间隔。

指数分布

指数概率分布已经广泛地应用于系统的可靠性分析和综合，因而在可靠性著作[6，7，8]中已广泛地进行了讨论。

指数分布的一些基本特性如下：

1、概率密度函数的表示形式为，

$$f(t)=\lambda e^{-\lambda t} \quad (t\geq 0) \cdots\cdots\cdots\cdots (7-21)$$

2、可靠性函数为，

$$R(t)=e^{-\lambda t} \cdots\cdots\cdots\cdots (7-22)$$

3、风险率为一常数 λ。

4、失效前的平均时间为，

$$MTTF=\frac{1}{\lambda} \cdots\cdots\cdots\cdots (7-23)$$

5、如果假设整个运行周期和非运行期间（停机时间）分别按平均$\frac{1}{\lambda}$和$\frac{1}{\mu}$指数分布，并在任一给定时间 $t=0$ 时系统在“运行”，那么系统正好在时间 t 运行的概率为，

$$a(t)=\frac{\mu}{\mu+\lambda}+\frac{\lambda}{\mu+\lambda}e^{-(\lambda+\mu)t} \cdots\cdots\cdots\cdots (7-24)$$

在两种座标中，用线性刻度，概率密度函数和累积分布函数分别如图 7—3(a)和(b)中所示。由于对这种函数常常用对数的时间刻度，在图(7—3)(c)和(d)中的曲线给出可靠性函数 $R(t)$ 和累积分布函数 $F(t)$，其中采用对数的时间刻度和线性的概率刻度。在所有情况下，时间刻度都统一为 $\frac{1}{\lambda}$ 的关系。所以，在时间等于 MTTF 时，直到这个时间不失效的概率只有0.368，可是有一个或多个失效的概率为0.632。当 λt 为0.1或更小时才得到合理的概率（0.9或更高）。

部分地，由于集中的理论研究[6, 9]和某经验数据[10]，可能多半是因为适合于数学特性，常常把概率密度函数认为和可靠性相同。例如：

1、如果系统由几个子系统串联组成。第三个子系统的参数为 $\lambda_i(i=1, 2, \cdots n)$，则系统的可靠性常常假设为，

$$R(t)=e^{-\lambda_s \cdot t} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (7—25)$$

$$式中\ \lambda_s=\sum_{i=1}^{n}\lambda_i \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (7—26)$$

最可能的估计量，λ，$\hat{\lambda}$ 是由失效数被除于总的无故障时间（一直观测到失效数 r 为止）而得来。这就意味着一个较短时间的较多项目的测试与一个较长时间的较少项目测试的结果 λ 相等，如果总无故障时间和 r 都相同的话。在此情况下，总的无故障时间为测试中所有项目的无故障运行时间的总和。

（图7—3见下页）

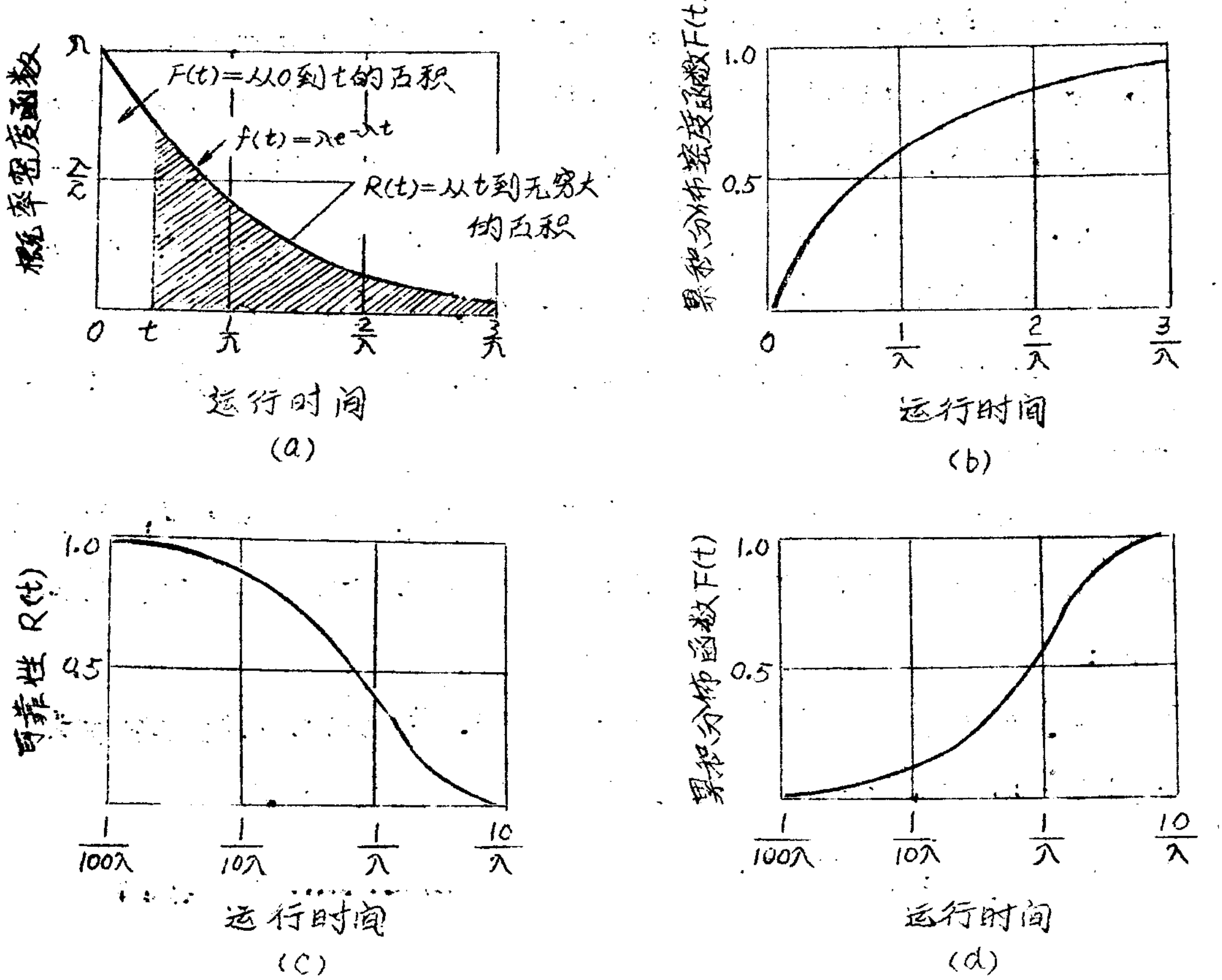

图7—3　指数分布

3、在上述条件下，$2r\lambda/\hat{\lambda}$按χ^2分布（见§3—1），自由度为2r，故可以简化置信区间和与r有关的重要测试。

4、如果环境出现以泊松方式分布的瞬时峰值和出现峰值时，某零件有固定的失效概率，于是结果会出现“指数分布”。

尽管要求这些特性，但应注意这种分布可能出现的下述缺点：

1、如果产品失效前时间的概率密度函数（pdf）为指数分布，则任何时间t之后，不失效的产品和新的一样好；就是说，在t+s的时间内，规定在t时不失效，失效的概率只与s有关。同样可以说，

风险率不随时间而变化。

2、以指数模型为依据的接受测试和标准对偏离本概率密度函数非常敏感，它们不适用于普通元器件。

3、实验充分证明，许多种元器件有不固定的失效率。通常有理论和实践的理由怀疑，100×n 个产品试验10小时是否能提供关于失效前平均时间（MTTF）或λ与n个产品，每个试验1000小时相同的证据。

指数分布特征指出可适用于元件的组合件，和由这些组合件组成的系统，但没有必要适用于元件本身，对于许多类型的元件，另外的分布方法比指数分布更适应。

可供选择的分布

可靠性和寿命试验的文章中曾提到的许多可供选择的分布方法，看来适于特殊类型的情况，包括寿命早期和前面提到的使用疲劳阶段。提到这些是为了说明个别产品（元件，组合件，子组合件等等）失效前的时间分布。有些是从物理原理或失效模式研究“13”中得出，其它的是以曲线对数据的经验适应性为依据，并在数学上便于处理[10, 14]。

经常使用的分布为正态分布，或高斯分布，对数，正态韦布尔，和Γ分布，因为这些是多参数分布，它们能用以配合经验数据比单参数指数分布好。这些概率密度函数（pdf）的大部用途适合于个别元件类型并用以说明特殊情况，例如，正态使用期以外时间，修理前的时间和某些其它修理参数，尽管它有局限性和一定条件，为了估计系统，指数概率密度函数还是经常被采用，由于这个原因，关于其它分布的讨论将推迟到8－5节。