

石油矿场设备可靠性

С.Г.巴巴耶夫
兆文清 刘真 译



石油工业出版社

目 录

1. 油矿设备的主要结构特点	(1)
1.1 油矿设备的简要指标	(1)
1.2 油矿设备零部件工作条件的特点	(5)
1.3 可靠性研究的基本方向	(7)
2. 可靠性理论的基本概念	(9)
2.1 可靠性术语、定义和定量指标	(9)
2.2 随机变量概率分布规律	(22)
2.3 油矿设备可靠性的设计预测	(28)
2.4 可靠性额定指标的确定	(31)
2.5 统计资料采集及处理的任务与目的	(34)
2.6 研究故障原因的方法	(44)
3. 典型油矿设备的无故障性和耐久性	(46)
3.1 零部件的可靠性数据及发生故障的主要原因	(46)
3.2 油矿设备零件磨损类型及故障的主要原因	(57)
3.3 提高油矿设备可靠性的基本方向	(62)
4. 油矿设备技术保养与修理规程的研究 (以修井设备为例)	(67)
4.1 根据可靠性指标确定部件免修期的理论研究	(67)
4.2 技术保养周期的确定	(77)
4.3 根据使用、观测结果确定可靠性指标	(84)
5. 海上油气田工艺设备可靠性的计算	(107)
5.1 工艺设备故障分类	(108)
5.2 整体自动化油矿设备可靠性指标的选择及原理	(112)
5.3 整体自动化工艺设备可靠性研究	(118)
5.4 整体工艺设备自动装置可靠性评估	(126)
5.5 海上丛式井平台整体自动化设备可靠性的计算	(132)
5.6 产品采集、处理和输送工艺系统功能可靠性的计算	(135)
6. 油井产品中金属耐磨性的研究	(142)
6.1 石油介质中粘着磨损的研究	(143)

6.2	石油介质中磨料磨损的研究	(160)
6.3	提高井口装置闸门零件耐磨性的实用技术	(176)
7.	油矿设备的修理工艺和组织	(179)
7.1	修理作业的组织, 设备修理的方法	(180)
7.2	设备的清理和洗涤	(184)
7.3	设备的拆卸	(185)
7.4	设备状态的技术检查	(188)
7.5	零部件的配套	(198)
7.6	设备和部件的装配	(199)
7.7	油矿设备安装工艺特点	(214)
7.8	油矿设备修理的集约化和专业化	(219)
8.	消除零件缺陷的工艺方法	(231)
8.1	机修-钳工加工	(232)
8.2	焊接和堆焊	(235)
8.3	金属喷涂	(242)
8.4	金属电镀层	(244)
8.5	粘接	(246)
8.6	零件的强化	(249)
8.7	修理业中先进的工艺方向	(250)
8.8	合理选择排除故障方法的依据	(254)
	主要符号一览表(指南)	(256)
	参考文献	(260)

1. 油矿设备的主要结构特点

1.1 油矿设备的简要指标

为了完成不同的作业任务，油气井开发过程中使用了多种专用的设备和工具，这是油矿现代技术的特点。油矿设备的组成和结构，是由其工作目的和具体用途所决定的。油藏勘探和工业性开采的工作内容包括：

研究（试验）完井后的产能；

根据油层压力，利用自喷、气举、泵抽或综合方法实现油气的开采；

井底地层的清洗和处理，排除沉积，注水，注气等辅助作业；

海洋石油矿场油气产品开发和集输工艺过程的控制和操作。

油气开采中采用的不同用途的设备和各种作业形式，必须同工作区域的自然气候和地质条件相适应。这是由各个勘探开发油气田的地理状况所决定的，即既要适应于极北地区，又要适应于海域和其它具有明显影响因素的地区。

油矿工艺和设备与其它工业部门大不相同。在油矿设备中，虽然也常采用传统的机械联接、传动装置、发动机、机构和部件，但其负荷能力和结构尺寸都较大。油矿设备的主要特点是，几乎每种设备的工艺和结构都具有很强的专业性，必须采用不同的材料、动力设备、控制操作系统和其它系统。

石油开采常用设备包括：自喷井和气举井的各种套管头和井口装置；泵抽井的井下设备和地面设备；综合开采或多层同时分别开采的专用设备以及其它设备。

自喷井的地面设备是井口装置，其专用零件通过法兰或管箍联接，用来密封油管与套管环形空间，控制和调节油井、气井、

凝析气井的产量。

油井的形式不同井口装置亦不同。由油管头和采油树按不同的形式组成井口装置，油管头用于悬挂油管，可悬挂一列或两列油管。采油树用于将油井的产品输入主管道，并调节使用工况和进行专门作业。封井装置采用专用闸门或旋塞，可保证在压力超过70MPa时封闭井口。封井装置和管件的结构取决于工作压力、通径、密封形式等工作条件。

内部注有润滑脂的单向闸阀，在井口装置上得到广泛应用。

抽油设备包括井下柱塞泵和安装在井口的抽油机。抽油机是井下柱塞泵的独立驱动机构，井下柱塞泵的柱塞由悬挂在抽油机游梁上的抽油杆拖动。抽油机主要包括减速器和四连杆机构。

也采用电动潜油离心泵、喷射泵、螺杆泵以及其它形式的泵。

采用井下柱塞泵抽油是机械采油最基本最普通的一种方法，产量为 $5.5\sim 400\text{m}^3/\text{d}$ ，井深达3500m。在各个石油矿场中，油井类型不同井下柱塞泵的形式（杆式或管式）和尺寸（泵径和长度）亦不同。油井的类型还决定了抽油机的形式和基本参数（ГОСТ 5866-76）：悬点最大允许负荷、冲程、冲次、曲柄轴最大允许扭矩等。

单作用柱塞泵是批量生产的高精度产品。无论何种形式的井下柱塞泵，都是由柱塞、泵缸、泵阀组成，杆式泵还带有锁紧支承机构。衬套式泵缸由一组（2~29节）单节长度为300mm的高精度衬套组成，装于工作筒内，两端用异径接头压紧。通过衬套端面严密贴合来保证泵缸的密封性。

管式泵适用于泵挂为1500m以内的油井，杆式泵适用于泵挂为2500m以内的油井。杆式泵通过抽油杆放入井中。对于含砂井、稠油井、大排量强采井、泵挂达3500m的深井和其它特殊井，通常采用具有相应结构方案和特种用途的井下柱塞泵。无衬套整体金属泵缸的井下柱塞泵已投入生产，并具有广阔的发展前景。

衬套式井下柱塞泵的基本工艺特点，是以 $25\mu\text{m}$ 为间隔对衬套进行分类挑选，再选配相应的柱塞，以满足泵缸柱塞副的配合精

度。柱塞与衬套的径向间隙分以下四个配合等级：

配合等级	0	I	II	III
间隙, mm	0~0.045	0.02~0.07	0.07~0.12	0.12~0.17

柱塞和衬套的制造精度要求很高。例如：直径允许偏差、流道形状精度、端面不垂直度不得超过0.03mm。

用于开采、试验和修井的设备及工具种类繁多。工厂在生产多用的综合性机组的同时，还生产专用的自行设备。

在油气井开采过程中，为恢复生产能力而要对油气井进行十分繁重的大小修工作。油气井大小修的工作内容包括：预防性工作（定期更换泵，排除油管渗漏等）；被迫性工作（发生事故时取出断裂的抽油杆，并装入新的抽油杆）；技术性工作（为满足生产工艺而更换泵、油管和抽油杆）。这些都需要进行繁重的起下作业。

广泛采用修井设备来完成起下作业。修井设备结构很复杂，由机械、液压、气动、电动各系统所组成，用来下放和提升油管和抽油杆以及上卸扣。

目前生产的修井设备Азинмаш-37А、Азинмаш-43А和Азинмаш-43П由传动机构、单滚筒绞车、带有游动轮系的井架（Азинмаш-37А除外）、前后支架和液压与气动系统、电动操作系统等主要部分组成。游动系统借助变速箱和分动箱由汽车（或拖拉机）发动机驱动。

Азинмаш-37А自行式修井设备安装在Краз-255Б型越野汽车的底盘上。吊钩的额定起重量为32t，游动轮系采用2×3（四股）索具。

Азинмаш-43А自行式修井设备安装在Т-100МБГС沼泽用履带式液压传动拖拉机底盘上。大部分部件与Азинмаш-37А通用。吊钩的额定起重量为28t，游动轮系采用2×3（四股）索具。

Азинмаш-43П自行式修井设备安装在Т-100МБ沼泽用履带

式拖拉机底盘上，是Азипмаш-43А的一种变型产品。滚筒的牵引力为75kN。

虽然各种油矿设备的性能和结构差异很大，但按其制造工艺、使用和修理特点仍可分为两种基本类型：地面设备和井下设备。

井下设备和工具是油矿专用技术。前面提到的井下柱塞泵、以及测井仪器、封隔器、截止阀、泵阀等井下设备和工具多制成管状，以适应油井有限的空间。虽然管体直径有限，但在管体内通常有复杂的机构，以完成各种工艺和作业。井下柱塞泵用于采油工艺操作；测井仪器用于油井研究；打捞工具等用于修井作业。按其用途和结构的不同，井下设备可分为机械驱动、液压驱动和电驱动等型式。

油矿井下设备的特殊使用条件，决定了井下设备具有以下结构与工艺特点：

零件制造和装配的精度高；

由于制造质量和精度要求高，装配中又大量采用螺纹联接，因此，对轴类零件的直线度、同心度和密封性等都有较高要求；

广泛采用高质量密封件（环、垫），这些密封件的可靠性直接影响设备的工作能力；

机构必须具有较高的可靠性，因为机构一旦失效就会造成重大损失，即便发生较轻的事故也要将机构从井下取出。

无论是地面设备还是井下设备，都是在具有外部介质的恶劣条件下工作的。并且负荷大、转速高。因此，对油矿设备提出以下特殊要求，这些要求对于生产，使用，技术维修是十分重要的。

1. 为了能够在各种恶劣条件下使用，要求产品具有足够的可靠性（无故障性）。

2. 要求技术指标对时间的稳定性，在使用周期内保持工作能力不变。

3. 具有较高的可修理性。

4. 用必须的最少的规格数目规定产品结构的标准化系列。

5. 具有较高的通用性和互换性，对于易损件更是如此。

油矿设备技术维修的组织工作非常重要，恶劣的工作条件使油矿设备的维修变得复杂而特殊。油矿设备使用地点的分散，维修装备能力的不足、设备修理往返运输的困难（经常是远距离的），以及其它诸多因素的影响，使得有效地解决复杂的工艺问题，以及合理地、及时地、保质地组织维修工作变得更加重要。

1.2 油矿设备零部件工作条件的特点

在使用过程中，设备在静负荷、动负荷和交变负荷的作用下，零件内部会产生不同性质的应力。许多零件处在磨料和腐蚀介质的作用下，同时又处在较高的恒温或周期性变化温度下。

油矿设备的工作条件十分恶劣。不仅作业空间受到局限，而且经常遇到有灰尘的介质。有时还会遇到潮湿性和腐蚀性介质，有时需要将修井设备周期性地各处移运，并按照安全技术规程将设备多次安装和拆卸等等。

气候条件差别也很大。北方地区冬季长，气温低到 -50°C ，有时可达 -60°C ；南方地区几乎无冬季，夏天气温高达 50°C 。气候会影响设备的受热状态，影响周围介质的腐蚀性，影响设备维修的难度和质量。在低温条件下使用时，由于材料的脆性增加，金属结构和零件可能发生破坏，常使空气压缩机、冷凝分离器以及采收系统失效。由于密封件和橡胶管的材料提前损坏或性能老化，会使润滑系统的工作受到破坏，引起机构和零件的严重磨损。

在气温较高的条件下，用橡胶材料和聚合材料制造的零件可能会提前损坏。由于空气含尘量的增加，也会使零件工作表面磨损加剧。例如，阿普歇伦半岛（Апшеронский Полуостров）常有风暴，风速达 35m/s ，使空气中饱含大量尘砂尘土。尘粒的分散度、形状、尺寸、硬度等直接影响磨砺作用的程度。如果砂土经密封装置渗入摩擦表面，就会使设备的某些零部件磨损加剧。在含尘量较大的条件下，密封质量和密封件的维护保养对零部件的使用寿命有决定性意义。

油矿设备的使用特点之一，是设备的工作内容和运转期经过

一定时间间隔之后又周期性重复，使加载条件、工作状况和停歇也相应的重复。例如，用专用设备进行测井作业、油井处理作业、修井作业或注水作业等，都有明确的工作循环周期。

修井设备的提升负荷按其作用特点可分为三种基本类型：

1. 经常性(常规)负荷，它取决于油管柱和抽油杆柱的重量，在下放和提升作业中多次重复发生。

2. 非经常性负荷，在进行打捞作业中短期内发生。

3. 随机性负荷，在实施修井技术措施（打捞作业等）过程中发生。

下放和提升油管和抽油杆是修井设备的主要工作内容。吊钩负荷及作业时间在修井作业过程中是变化的，并在设计系挂下达到最大值。其变化的幅度取决于油井的下放和提升作业范围。在设备整个使用期内，由于交变负荷的作用使承载元件的工作状况不确定。这就是说，各种设备在其使用期间，只要其零件应力幅按随机规律多次变化，那么设备的负荷即可简单地描述为是不稳定的。已知负荷交变（应力循环）总次数与负荷幅度谱之间的关系，就能相当可靠地得出其负荷特性。

各个石油矿区的油井都有各自地质上和开发上的特点，甚至同一石油矿区的油井也常见明显差异。因此，应当通过对修井次数和有效负荷数据的统计整理，把已掌握的规律确定为相应随机函数的数学期望。

在保证额定工作年限的前提下，管柱最大重量下的吊钩许用负荷称为额定起重量，它是修井设备最重要的参数。根据修井设备在提升和下放管柱以及事故处理时所承受的非经常性负荷和随机负荷，可求出修井设备的另一个重要参数，即吊钩最大起重量。

井下设备和井口装置的许多零件，在油井产品的作用下会发生磨损。

石油按烃类化学成分来区分，即按馏分的轻重以及含氧化合物——环烷烃、脂肪酸、沥青和树脂物质的含量来区分。在开采

过程中，石油的含氧化合物牢固地吸附在金属零件表面，形成边界层。在油和油水介质中，金属的磨损程度主要取决于介质的化学成分，其中包括油水中的盐类。对砂岩和弱胶结构砂岩构造中的油气井，在开采过程中，油气在一定的流动速度下，由于油气中砂粒的磨砺作用，使零件磨损加剧。

因此，对油矿设备提出了特别高的要求，其中最重要的就是保证设备必要的可靠性。

1.3 可靠性研究的基本方向

设备的可靠性通过正确选择部件的运动方式和结构，采用先进的制造工艺，建立合理的使用和技术保养制度来保证。

设备的可靠性取决于许多因素：负荷的性质和大小、配合零件的材料和结构、制造质量、使用条件等。大部分因素的影响具有随机性（随机变动负荷、金属中的缺陷等），引起的故障也同样具有随机性。因此，在评估可靠性所用的所有参数时（第一次故障前工作时间或相邻故障之间的间隔时间、一定时间的故障次数等）也都具有随机性。所以，设备可靠性的基本规律是根据统计资料并运用概率论和数理统计的定律来确定的。

从使用条件出发，应对油矿设备可靠性提出更高的要求，因为设备的突发性故障可能带来很大麻烦和严重事故。

在设备设计和制造过程中，设计师和工艺师一般只重视规定的技术经济指标，而对保证必要的可靠性这一课题未做认真考虑。其主要原因是缺乏批量生产设备的故障资料 and 实际可靠性资料。因此，要提高在极其恶劣条件下工作的油矿设备的可靠性，就必须在揭示故障原因方面和引起故障的物理实质方面进行深入地探讨。

保证高可靠性的手段之一，是执行有效的设备技术维修规范。解决可修理部件可靠性的评估方法和研究技术维修周期的制订方法，是拟订设备技术维修规范的基础。

大陆架油气资源的开发提出了一些复杂的技术问题。由于海洋油气开采设备安装工程投资巨大以及安装修理工作技术复杂，

因此，只有在设备具有很高的可靠性的前提下，经济上才能获得效益。此外，在海洋固定平台上使用油气开采设备，还存在保护周围环境免遭油气污染等极其重要的问题。上述问题都应在设计过程中通过对不同方案的可靠性对比计算来解决。但现有的可靠性计算方法，不适于海洋固定平台油气开发系统。缺乏相应的方法，就不可能对海洋油气开发系统的可靠性作出客观的评估，因而也就不可能保证其工作所必须的质量。

对于油矿设备的大部分零部件，通常以零件工作表面磨损程度作为衡量单个零件使用寿命的标准。可是，对零件在油水介质中的磨损规律尚未全面掌握。这就需要进行相应的研究，以便提出提高耐磨性，从而提高设备可靠性的有根据的建议。

上述问题的解决直接涉及到：

揭示零部件早期出现故障的特征和原因，确定故障的物理实质及其概率模型；

用合适的监测方法获得部件可靠性的概率特性，以此作为评估可靠性的依据；

根据部件使用寿命的分布规律制订技术维修方案；

根据设备的运行质量和环保要求，拟订海洋固定平台设备可靠性的计算方法；

对磨损形式进行分类，确定零部件在油水介质中磨损的基本形式和发展规律。

2. 可靠性理论的基本概念

2.1 可靠性术语、定义和定量指标

可靠性问题贯穿于设备制造的全部过程以及设备整个服役期。可靠性在设备的研究、结构设计和计算阶段就已产生，并在制造过程中通过生产工艺的正确选择和对加工质量的监控获得保证。可靠性的维持是靠对设备采取正确的保管方法和运输方法，靠遵守使用规程、保养制度和维修规则得以实现。

科技资料中有关可靠性的术语和基本概念，在苏联国家标准 ГОСТ 27.002—83《可靠性技术术语和定义》中已有明确规定。

可靠性是指在规定的工作条件、使用条件、技术维护条件、保管条件和运输条件下，规定的时间内，设备完成所规定功能的全部参数都保持在规定数值范围内的性能。

可靠性是一个综合性指标，根据设备的用途和使用条件，可靠性取决于下列指标：无故障性、耐久性、可修复性和耐贮存性。

无故障性是指在某段时间或在某段工作时间内，设备保持持续无故障工作状态的性能。

设备可以是产品、系统或其元件，其中包括装置、装置的单个机构、仪器及其部件、机组、装配单元和单个零件。

耐久性是指在规定的技术维护制度下，设备在达到某极限状态之前，保持能工作状态的性能。该极限状态是指设备在这个状态下若继续使用，按照规定已属不允许或不合理；或者说，要将其恢复成良好状态或工作状态已属不可能或不合理。

可修复性是指设备预报及显示故障或损伤的原因，以及通过技术维护恢复能工作状态的性能。

耐贮存性是指设备在保管和运输期间，以及保管和运输之后，保持无故障性、耐久性和工作能力指标不变的性能。耐贮存性反

映设备抵抗由于保管、运输的条件和保管、运输时间的长短，对设备无故障性、可修复性和耐久性产生不良影响的能力。

上述性能（无故障性、耐久性、可修复性和耐贮存性）由于具体设备和使用条件不同，其重要性可能有所不同。如对于大多数不可修复的设备，无故障性是其主要的指标。而对于可修复设备来说，可修复性可能是其主要的指标之一。

设备可处于完好或非完好、能工作或不能工作状态。

完好状态是指设备处于完全符合技术标准或设计文件要求的状态。

非完好状态是指设备处于不完全符合技术标准或设计文件要求的状态（即使只有一项要求不符合标准）。

能工作状态是指设备完成规定功能的所有参数均符合技术标准或设计文件要求的状态。

不能工作状态是指设备完成规定功能的参数不符合技术标准或设计文件要求的状态（即使只有一项参数不符合标准）。

“完好状态”的概念比“能工作状态”的概念更广义一些。如果设备是完好的则必然是能工作的，而能工作的设备则可能是非完好的。这时的非完好性没有使设备受到实质性损坏，以致达到妨碍设备正常运行的程度（例如外观损坏）。

损伤是指由于外界作用对设备的影响超过技术标准所规定的程度，使设备的完好状态受到破坏，但仍然保持能工作状态。损伤有大有小，大的损伤意味着设备故障，小的损伤则是指设备的完好状态受到破坏，但仍然保持能工作状态。

设备丧失能工作状态的事件称为故障。

在技术标准或设计文件中规定的不能工作状态的特征及其总和称为故障准则。可按不同的特征对故障进行分类，如表2.1所示。

突然故障的特点是设备的一个或几个参数发生突如其来的变化；而渐变故障的特点是设备的一个或几个参数发生渐进的变化。

间歇故障是指具有相同特征并多次发生又自行消失的故障。

故障之间设备的工作时间和修复时间都是连续型随机变量，

表 2.1 故障分类

分类特征	故 障
发生条件	在使用中发生的, 在保管中发生的, 在运输中发生的
发生原因	由零件损坏引起的, 由零件磨损引起的
根 源	设计上的, 制造上的, 使用上的
表现特点	突然的, 渐变的, 明显的, 隐蔽的, 总体的, 局部的
出现的频率	一次性的, 经常的, 间断的
故障相互联系	独立的, 相关的
后 果	危险的, 不危险的, 轻的, 重的
消除难度	容易的, 困难的
预测可能性	根据工作时间或根据参数分为可预测的, 不可预测的

这些变量值按某个概率分布在一定的可能值范围内。随机变量可能值同相应概率联系起来的规律称为随机变量分布规律。

如果用 ξ 表示随机变量, 用 x 表示任意实数, 则把 ξ 取值小于 x 的那个概率称为随机变量的分布积分函数或随机变量概率的分布规律, 简称分布函数。则

$$F(x) = P\{\xi \leq x\} \quad (2.1)$$

在可靠性理论中, 最合理的方法是采用分布函数的导数, 即采用随机变量分布密度或分布微分函数来评估相邻故障间隔时间。它是确定随机变量分布规律的另一种表达形式

$$f(x) = dF(x)/dx \quad (2.2)$$

通常, 可靠性理论研究的随机变量都是连续型随机变量, 可通过式 (2.1) 或式 (2.2) 求得。但是, 有时会遇到离散型随机变量, 如被修理设备在某一有限的已工作时间内的故障数。这时随机变量的分布函数的形式为

$$P_i = P(\xi = a_i)$$

式中 P_i ——随机变量取 a_i 的概率;
 a_i ——离散型随机变量可能值,
 $i=1, 2, \dots, n$

n ——随机变量可能值数目。

随机变量同概率分布函数一样可用数值来描述，这些数值可根据随机变量分布函数的确定规则求得。这些数值即称为随机变量的数学特征。其中最重要的有数学期望（或均值）、方差、均方差和变异系数。

随机变量 ξ 的数学期望由某一完全确定的数值来描述，在此数值的附近集聚着随机变量的可能值。则

$$M[\xi] = \int_{-\infty}^{+\infty} x f(x) dx \quad (2.3)$$

因为可靠性理论研究的都是正随机变量，所以，数学期望通用公式中的积分下限总等于零。数学期望的量纲与随机变量自身的量纲相同。

用方差的数学特征来评估随机变量值与其均值的偏离程度。方差用 $D[\xi]$ 或 $\sigma^2[\xi]$ 表示，并定义为随机变量与其数学期望之差的平方的数学期望

$$D[\xi] = M[\xi - M(\xi)]^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} [x - M(\xi)]^2 f(x) dx$$

把方差的平方根称为均方差

$$\sigma = [\xi] = \sqrt{D[\xi]} \quad (2.4)$$

随机变量的值越分散，得到的方差值和均方差值越大。

均方差的量纲与数学期望的量纲相同，因此也就与随机变量自身的量纲相同。

把如下的比值称为变异系数

$$v[\xi] = \sigma[\xi] / M[\xi] \quad (2.5)$$

为了更全面地评估设备的可靠性，必须说明设备的无故障性、耐久性、可修复性和耐贮存性一系列指标。这些指标的选择和确定必须考虑设备的特点、工作状态、使用条件、故障后果。给定工作状态、使用条件、技术维修条件、保管和运输条件，便可确定各项指标的值。

无故障性指标

无故障工作概率

无故障工作概率是指在给定的工作时间内，设备不发生故障的概率，是设备最基本最普通的指标。

设 t 为被研究设备的工作时间，而 T 为设备无故障工作的随机时间，即从工作开始至出现第一次故障所经历的时间。那么，事件 $T > t$ 则表示在时间 t 范围内，设备不会发生一次故障。

对于每一个 t 值，均存在一个 $T > t$ 的确定概率，即 $P(t) = P\{T > t\}$ 。由此可见， $P(t)$ 是 t 的函数，这个函数称为无故障工作概率。

函数 $P(t)$ 是时间的连续函数，此函数具有如下明显的性质：

$P(0) = 1$ ，适用于产品工作开始时刻；

$P(t)$ 是时间的单值递减函数；

当 $t \rightarrow \infty$ 时， $P(t) \rightarrow 0$ 。

因此，无故障工作概率在有限时间间隔内，其可能值为 $0 < P(t) < 1$ 。

无故障工作的统计概率是指完好工作的产品数目与被检查产品的总数目之比

$$P^*(t) = N(t)/N(0) = [N(0) - d'(t)]/N(0) \quad (2.6)$$

如果根据统计资料已经确定被研究的随机变量的经验分布与所采用的理论分布的逼近程度，那么，就可以按已知的数学关系式计算出故障概率。

故障概率

完好工作与故障是对应的事件，因此，可靠性的另一个定量指标是故障概率。故障概率是指设备在规定时间内可能发生故障的概率，即使只发生一次故障。但在开始时，设备是能工作的。

故障概率用 $q(t) = P\{T \leq t\}$ 表示，由此可见，故障概率是故障前随机工作时间的分布函数。

故障概率的统计评估是指时间 t 内发生故障的设备数与在初始 $t=0$ 时完好的设备数之比

$$q^*(t) = d'(t)/N(0) \quad (2.7)$$

无故障工作概率与故障概率在0至 t 时间内存在如下关系

$$q(t) = 1 - P(t)$$

故障率

故障率是评定无故障性随时间变化的一种简便指标,它是指在某研究时刻之前尚未发生过故障的条件下,在该时刻所确定的不可恢复设备发生故障的条件概率密度

$$\lambda(t) = \frac{1}{P(t)} \cdot \frac{d}{dt} q(t)$$

根据在 t 时间内的故障概率密度来确定故障率。而在 t 时间内的故障概率密度,可理解为当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时,在 t 至 $t + \Delta t$ 时间内,故障概率与 Δt 比值的极限。故障概率密度的物理意义是在无限小的单位时间内的故障概率。

由故障率 $\lambda(t)$ 的定义可得 $P(t)\lambda(t)\Delta t = f(t)\Delta t$,因此有

$$\lambda(t) = f(t)/P(t) \quad (2.8)$$

这就是已知无故障工作时间分布规律用分析法确定 $\lambda(t)$ 的公式。

故障率作为可靠性的定量指标,能直观地反映出设备的特征工作期。

故障率的典型曲线通常有三段明显的特性区域。曲线的第一区域即从0至 t_1 ,其特点是故障率相对较高。在这个时期内,主要是由于设计上的错误或制造工艺不当所引起的突然故障。这个时期称为磨合期。

曲线 $\lambda(t)$ 的第二个区域即从 t_1 到 t_2 ,其特点是故障率约为一定值。在机器使用过程中,这是一个主要的也是时间最长的时期。在此时期内,机器的突然故障不多,主要由于生产的潜在问题和个别零件的提前磨损所引起。这个时期称为正常工作期。正如后面将要阐述的那样,如果无故障工作时间为指数分布规律,则故障率与故障前工作时间成反比关系。则

$$\lambda = 1/t_0$$

曲线 $\lambda(t)$ 的第三个区域即从 t_2 及以后,其特点是故障率明显